UNIVERSITATEA TEHNICĂ “GHEORGHE ASACHI” DIN IAŞI
FACULTATEA DE CONSTRUCȚII ȘI INSTALAȚII IAȘI

# CONTRIBUȚII LA ANALIZA MULTICRITERIALĂ PENTRU OPTIMIZAREA SOLUȚIILOR DE REABILITARE A CLĂDIRILOR

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Student doctorand:
Ing. Alexandru-Nicolae Bizu

Conducător de doctorat,
Prof. univ. em. dr. ing. Dorina Nicolina ISOPESCU

IAȘI, 2026

” *Ingineria... este o mare profesiune. Este fascinația de a vedea cum o mare plăsmuire a imaginației se transformă cu ajutorul științei într-un plan pe hârtie. Ca apoi să se materializeze în piatră, metal sau energie. Ca apoi să creeze locuri de muncă și locuințe pentru oameni. Ca apoi să aducă la creșterea standardului de viață și la sporirea confortului. Acesta este înaltul privilegiu al inginerului.”*

Herbert Hoover, al 31-lea Președinte al Statelor Unite

**CUPRINS**


| | TEZĂ | REZUMAT |
|---|---|---|
| **CUPRINS** | **i** | **1** |
| **REZUMAT** | **v** | **-** |
| **ABSTRACT** | **vii** | **-** |
| **LISTA ABREVIERILOR** | **ix** | **-** |
| **LISTA SIMBOLURILOR** | **x** | **-** |
| **Capitolul 1 - INTRODUCERE** | **1** | **1** |
| *1.1. Generalități* | *1* | *1* |
| *1.2. Motivația și obiectivele cercetării* | *5* | *1* |
| *1.3. Conținutul tezei de doctorat* | *7* | *-* |
| **Capitolul 2 - STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN DOMENIUL CONSOLIDĂRII CONSTRUCȚIILOR CU STRUCTURA DE REZISTENȚĂ DIN BETON** | **9** | **2** |
| *2.1. Bazele consolidării construcțiilor existente* | *9* | *2* |
| 2.1.1. Aspecte generale | 9 | 2 |
| 2.1.2. Aspecte specifice | 12 | - |
| 2.1.3. Abordări multicriteriale în selecția soluțiilor de consolidare seismică | 18 | 3 |
| *2.2. Degradarea structurilor. Cauze și efecte* | *19* | *-* |
| 2.2.1. Degradări mecanice și fizice | 19 | 4 |
| 2.2.2. Degradări chimice | 22 | 4 |
| 2.2.3. Degradări produse de acțiuni seismice | 24 | - |
| *2.3. Nivelurile de deteriorare ale structurilor cu mai multe etaje* | *25* | *4* |
| *2.4. Expertiza structurală: evaluarea capacității portante* | *28* | *5* |
| *2.5. Materiale și sisteme utilizate la repararea și consolidarea clădirilor* | *32* | *6* |
| *2.6. Consolidarea la acțiuni seismice a clădirilor multietajate* | *35* | *6* |
| *2.7. Concluzii* | *38* | *7* |
| **Capitolul 3 - CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE DE CONSOLIDARE EXTERIOARE** | **41** | **7** |
| *3.1. Introducere* | *41* | *-* |
| 3.1.1. Noțiuni introductive privind sistemele de consolidare exterioare | 41 | 7 |
| 3.1.2. Dezvoltarea sistemelor de consolidare exterioare | 43 | - |
| *3.2. Clasificarea sistemelor de consolidare exterioare* | *47* | *8* |

| | | |
|---|---|---|
| 3.2.1. Sisteme de rigidizare exterioară prin cadre | 47 | - |
| 3.2.2. Sisteme de rigidizare exterioară prin contravântuiri | 50 | 10 |
| 3.2.3. Sisteme de rigidizare exterioară prin pereți structurali | 51 | 10 |
| *3.3. Avantajele sistemelor de consolidare exterioare* | *55* | *11* |
| *3.4. Dezavantajele sistemelor de consolidare exterioare* | *57* | *12* |
| *3.5. Metode de analiză structurală* | *60* | - |
| 3.5.1. Metoda statică echivalentă | 60 | - |
| 3.5.2. Metoda spectrului de răspuns modal | 61 | - |
| 3.5.3. Metoda statică echivalentă modală | 61 | - |
| 3.5.4. Analiza pushover | 61 | - |
| 3.5.5. Analize istorice de integrare numerică | 63 | - |
| 3.5.6. Analiză comparativă a metodelor de analiză structurală | 64 | 12 |
| *3.6. Concluzii* | *65* | 13 |
| **Capitolul 4 - REZULTATE ALE PROGRAMULUI EXPERIMENTAL PRIVIND SISTEMELE DE ANCORARE A STRUCTURILOR EXTERIOARE DE CONSOLIDARE** | **67** | **14** |
| *4.1. Introducere* | *67* | *14* |
| *4.2. Construirea și instrumentarea modulelor de îmbinare* | *72* | *14* |
| *4.3. Caracteristicile fizice și mecanice ale materialelor* | *79* | - |
| 4.3.1. Beton | 79 | 17 |
| 4.3.2. Oțel pentru armături | 80 | 17 |
| 4.3.3. Adezivul structural utilizat pentru ancorare | 80 | 17 |
| *4.4. Rezultate și moduri caracteristice de cedare* | *81* | - |
| 4.4.1. Curbele forță–deplasare | 82 | 17 |
| 4.4.2. Capacitatea portantă a sistemelor de ancorare | 84 | 19 |
| 4.4.3. Moduri caracteristice de cedare | 91 | 19 |
| *4.5. Concluzii* | *92* | *20* |
| **Capitolul 5 - MODELAREA NUMERICĂ A COMPORTAMENTULUI STRUCTURAL LA SMULGERE A SISTEMELOR DE ANCORARE** | **97** | **20** |
| *5.1. Prezentare generală a metodei FEA* | *97* | *20* |
| 5.1.1. Conceptul de analiză cu elemente finite aplicat comportamentului structural la smulgere a sistemelor de ancorare | 98 | - |
| *5.2. Modelarea numerică a comportamentului structural la smulgere a modulelor de îmbinare* | *100* | *21* |
| *5.3. Analiza stării de tensiuni–deformații specifice pentru modulele de îmbinare* | *102* | - |
| 5.3.1. Geometria modelului și discretizarea | 102 | - |

| | | |
|---|---|---|
| 5.3.2. Proprietățile materialelor utilizate în modelare | 103 | 22 |
| 5.3.3. Condiții de rezemare și încărcare | 104 | 23 |
| 5.3.4. Definirea contactelor și ipoteze de modelare | 105 | 23 |
| 5.3.5. Analiza stării de tensiuni și deformații | 105 | 23 |
| *5.4. Comparații între modelarea numerică și încercările experimentale* | *106* | *23* |
| *5.5. Concluzii* | *110* | *25* |
| **Capitolul 6 - CERCETĂRI PRIVIND CONSOLIDAREA EXTERIOARĂ. STUDIU DE CAZ** | **113** | **25** |
| *6.1. Prezentare studiu de caz* | *114* | - |
| 6.1.1. Descriere generală a structurii analizate | 114 | *25* |
| 6.1.2. Vulnerabilitatea structurală inițială | 116 | *26* |
| 6.1.3. Obiectivul metodologic al studiului de caz | 116 | *26* |
| *6.2. Analiza multicriterială a structurilor etajate la acțiunea seismică* | *117* | - |
| 6.2.1. Criterii de evaluare a răspunsului seismic | 118 | 27 |
| 6.2.2. Aplicarea cadrului multicriterial în studiul de caz | 119 | - |
| *6.3. Analiza seismică – cadru metodologic aplicat* | *119* | - |
| 6.3.1. Modelarea structurală și ipoteze de calcul | 121 | - |
| 6.3.2. Metodologia de evaluare a răspunsului seismic | 121 | - |
| 6.3.3. Metodologia de determinare a eforturilor de interfață | 123 | 28 |
| *6.4. Studiu de caz. Modelare și analiză structurală* | *124* | - |
| 6.4.1. Dimensionarea grupurilor de ancore pentru îmbinările analizate | 132 | 29 |
| 6.4.1.1. Îmbinarea stâlp existent – perete exoschelet | 137 | 30 |
| 6.4.1.2. Îmbinarea nod existent – grindă exoschelet | 146 | 30 |
| 6.4.1.3. Îmbinarea planșeu existent – placă exoschelet | 149 | 30 |
| 6.4.1.4. Concluzii privind dimensionarea îmbinărilor | 155 | 31 |
| 6.4.2. Modelare și analiză structurală pentru clădirea existentă | 157 | - |
| 6.4.3. Modelare și analiză structurală pentru clădirea consolidată | 160 | 32 |
| 6.4.4. Analiza comparativă a răspunsului structural | 163 | 33 |
| *6.5. Concluzii* | *171* | 36 |
| **Capitolul 7 - CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII. VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL PROGRAMULUI DE CERCETARE DOCTORALĂ. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE** | **173** | **38** |
| *7.1. Concluzii generale* | *173* | *38* |
| *7.2. Contribuții* | *175* | *38* |
| *7.3. Valorificarea rezultatelor programului de doctorat* | *179* | *39* |

| | | |
|---|---|---|
| *7.4. Direcții viitoare de cercetare* | *181* | 39 |
| **BIBLIOGRAFIE** | **185** | **40** |
| **LISTA FIGURILOR** | **195** | **-** |
| **LISTA TABELELOR** | **199** | **-** |
| **ANEXE** | **201** | **-** |


Teza de doctorat este extinsă pe un număr de **231 de pagini**, în lucrare fiind incluse **50 de figuri**, **25 de tabele** și **3 de anexe**. Pentru redactarea acesteia au fost utilizate **111 de referințe bibliografice**.

Rezumatul tezei de doctorat respectă numerătoarea paragrafelor, figurilor și tabelelor prezentate în lucrare.

# Capitolul 1

# INTRODUCERE

## 1.1. Generalități

Creșterea exigențelor privind siguranța seismică a construcțiilor și necesitatea prelungirii duratei de exploatare a fondului construit existent au determinat dezvoltarea unor noi concepte și metodologii de consolidare structurală. O mare parte dintre clădirile existente au fost proiectate și executate în conformitate cu reglementări tehnice diferite de cele actuale, fără a satisface cerințele moderne privind ductilitatea, disiparea energiei sau controlul deplasărilor laterale. Cu toate acestea, numeroase structuri au demonstrat, în urma unor cutremure majore, un nivel de performanță superior celui estimat prin metodele convenționale de calcul, evidențiind existența unor rezerve de rezistență și a unor mecanisme reale de comportare care nu sunt întotdeauna surprinse în modelele simplificate utilizate în practica inginerească.

Consolidarea structurilor existente nu mai poate fi abordată exclusiv prin prisma creșterii capacității portante, ci trebuie analizată ca un proces complex, în care cerințele de siguranță structurală sunt corelate cu menținerea funcționalității clădirilor, optimizarea costurilor de intervenție, reducerea impactului asupra utilizatorilor și integrarea principiilor dezvoltării durabile. Aceste aspecte sunt deosebit de importante în cazul construcțiilor aflate în exploatare continuă, precum spitalele, clădirile administrative sau alte obiective de interes public, unde soluțiile clasice de consolidare, realizate predominant prin intervenții la interior, sunt dificil de aplicat.

O alternativă viabilă o reprezintă utilizarea sistemelor structurale exterioare de tip exoschelet, capabile să preia o parte semnificativă din acțiunile seismice fără afectarea funcționalității spațiilor interioare. Prin creșterea rigidității globale și redistribuirea eforturilor, aceste sisteme contribuie la îmbunătățirea răspunsului seismic al construcției și oferă posibilitatea integrării intervențiilor structurale cu măsuri de reabilitare energetică și arhitecturală. Performanța lor depinde însă în mod direct de comportarea conexiunilor dintre structura existentă și sistemul de consolidare, respectiv de mecanismele reale de transfer al eforturilor prin elementele de legătură.

## 1.2. Motivația și obiectivele cercetării

Analiza literaturii de specialitate și a practicii inginerești evidențiază faptul că proiectarea structurilor consolidate este realizată, în multe situații, prin tratarea separată a analizei structurale globale și a verificărilor locale ale conexiunilor. Această abordare conduce la dificultăți în evaluarea solicitărilor reale din interfețele structurale și poate genera soluții excesiv conservatoare sau insuficient fundamentate. În consecință, apare necesitatea dezvoltării unei metodologii integrate, care să permită corelarea directă dintre răspunsul global al structurii și dimensionarea elementelor locale de transfer al eforturilor.

Pornind de la această problematică, cercetarea prezentată în teză urmărește dezvoltarea unei metodologii de analiză și proiectare pentru structuri consolidate prin exoschelete din beton armat, bazată pe integrarea investigațiilor experimentale, a modelării numerice și a analizelor structurale tridimensionale. Demersul propus are ca obiectiv identificarea mecanismelor reale de transfer al eforturilor dintre structura existentă și sistemul de consolidare, dezvoltarea unei metode de determinare a eforturilor de interfață utilizând secțiuni de tăiere (Section Cut), validarea modelelor de calcul prin încercări experimentale și simulări numerice, precum și aplicarea metodologiei într-un studiu de caz reprezentativ pentru fondul construit existent.

Prin atingerea acestor obiective, teza propune un cadru unitar de analiză și proiectare, capabil să coreleze comportarea globală a structurilor consolidate cu mecanismele locale de transfer al eforturilor și să contribuie la fundamentarea unor soluții de consolidare adaptate cerințelor actuale privind siguranța structurală, funcționalitatea clădirilor și dezvoltarea durabilă.

# Capitolul 2

# STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII ÎN DOMENIUL CONSOLIDĂRII CONSTRUCȚIILOR CU STRUCTURA DE REZISTENȚĂ DIN BETON

*Capitolul 2 fundamentează cadrul teoretic și normativ al cercetării, prin analiza stadiului actual al cunoașterii privind evaluarea, degradarea și consolidarea construcțiilor existente cu structura de rezistență din beton armat. Necesitatea acestei analize derivă din faptul că o parte importantă a fondului construit a fost proiectată și executată în perioade în care cerințele privind siguranța seismică, ductilitatea, durabilitatea și controlul deplasărilor laterale erau diferite față de cele actuale. În consecință, numeroase clădiri existente prezintă vulnerabilități care impun evaluări tehnice riguroase și soluții de intervenție adaptate comportării reale a sistemului structural.*

## 2.1.1. Aspecte generale

Evaluarea construcțiilor existente nu poate fi limitată la verificarea rezistenței elementelor structurale individuale, ci trebuie realizată în corelare cu comportarea globală a clădirii, cu nivelul de degradare acumulat în timp și cu cerințele actuale privind performanța seismică. Experiența cutremurelor majore produse în ultimele decenii a arătat că avariile severe și colapsurile nu sunt determinate exclusiv de rezistența insuficientă a unor elemente, ci și de deficiențe de alcătuire structurală, lipsa ductilității, discontinuități ale traseului eforturilor, neregularități în plan sau pe verticală și detalii constructive necorespunzătoare. Această evoluție a condus la trecerea de la abordările bazate strict pe rezistență către evaluări orientate pe performanță structurală și pe înțelegerea mecanismelor reale de comportare seismică. În prezent, evaluarea structurilor existente

se bazează pe o abordare integrată, care combină investigațiile vizuale, încercările experimentale, modelarea numerică și verificările efectuate în conformitate cu reglementările tehnice în vigoare. Analiza comportării structurale urmărește nu doar identificarea deficiențelor existente, ci și înțelegerea mecanismelor prin care acestea influențează răspunsul construcției la acțiuni seismice. O astfel de abordare permite stabilirea unor soluții de intervenție fundamentate tehnic, adaptate particularităților fiecărei construcții și nivelului de performanță urmărit după consolidare. În acest mod, procesul de evaluare devine etapa esențială pe baza căreia sunt definite strategia de intervenție și criteriile de dimensionare ale măsurilor de consolidare. Principalele etape ale procesului de evaluare structurală sunt sintetizate în Figura 2.1.




**Figura 2.1.** Etapele procesului de evaluare structurală a construcțiilor existente.

### 2.1.3. Abordări multicriteriale în selecția soluțiilor de consolidare seismică

Capitolul evidențiază, de asemenea, legătura dintre siguranța structurală și performanța energetică a fondului construit existent. La nivel european, renovarea clădirilor este analizată tot mai frecvent printr-o abordare integrată, în care intervențiile de eficientizare energetică trebuie corelate cu măsuri de evaluare și consolidare structurală. Această direcție este relevantă mai ales pentru zonele cu hazard seismic ridicat, unde modernizarea energetică a clădirilor fără verificarea vulnerabilității structurale poate conduce la menținerea unor riscuri semnificative. În acest cadru, soluțiile de consolidare trebuie analizate multicriterial, prin raportare la performanța seismică, funcționalitatea clădirii, costurile de intervenție, durata execuției și posibilitatea menținerii construcției în exploatare.

### 2.2.1. Degradări mecanice și fizice

O componentă importantă a capitolului este reprezentată de analiza proceselor de degradare ale structurilor din beton armat. Sunt prezentate principalele categorii de degradări mecanice, fizice, chimice și biologice, cu accent asupra fenomenelor care afectează direct capacitatea portantă și durabilitatea elementelor structurale. Fisurarea este tratată ca fenomen caracteristic betonului armat, dar și ca factor care influențează durabilitatea, deoarece facilitează pătrunderea agenților agresivi și accelerează procesele de degradare chimică.

### 2.2.2. Degradări chimice

Degradările chimice, în special carbonatarea betonului și coroziunea armăturilor, sunt analizate prin efectele lor asupra secțiunii eficiente a armăturii, aderenței beton–oțel, rigidității și capacității portante. În cazul acțiunilor seismice, degradările pot evolua de la avarii locale, precum fisurarea elementelor sau deteriorarea nodurilor, către mecanisme globale de cedare, cu pierderi importante de rigiditate laterală și stabilitate.

## 2.3. Nivelurile de deteriorare ale structurilor cu mai multe etaje

Nivelurile de deteriorare ale structurilor multietajate sunt analizate prin raportare la metodologiile internaționale de evaluare a performanței seismice și la cadrul normativ național, iar principalele mecanisme de degradare structurală care conduc la diminuarea performanței seismice sunt sintetizate în Figura 2.2. Clasificările utilizate în metodologia FEMA, precum Immediate Occupancy, Life Safety și Collapse Prevention, permit corelarea stării de afectare structurală cu capacitatea clădirii de a rămâne funcțională sau stabilă după un eveniment seismic. În România, evaluarea construcțiilor existente este reglementată prin P100-3/2019, care stabilește metodologia de expertizare și încadrare în clase de risc seismic. Capitolul subliniază faptul că nivelul de deteriorare nu trebuie interpretat doar descriptiv, ci ca o etapă de legătură între inspecția vizuală, investigațiile experimentale, analiza structurală și fundamentarea soluțiilor de consolidare.

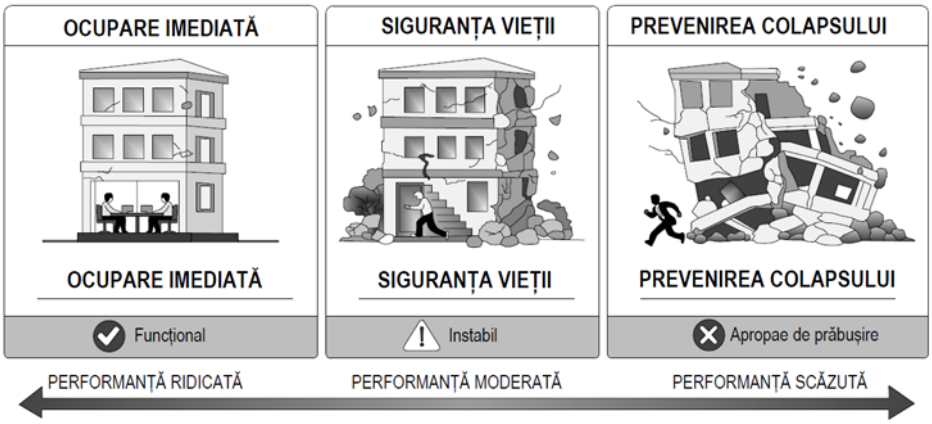
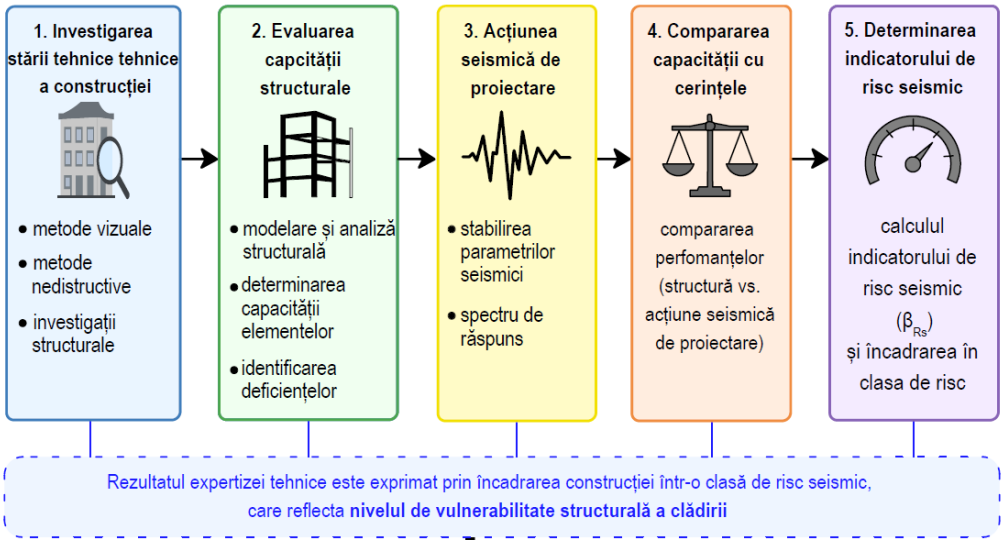



**Figura 2.2.** Mecanisme de degradare structurală în clădiri multietajate. (elaborare pe baza mecanismelor de deteriorare seismică descrise în FEMA (2018) și Fardis (2009)).

## 2.4. Expertiza structurală: evaluarea capacității portante

Expertiza structurală reprezintă instrumentul principal de evaluare a siguranței clădirilor existente, combinând analiza documentației tehnice, inspecția vizuală, investigațiile asupra materialelor, determinarea poziției armăturilor și modelarea structurală. Rezultatul constă în încadrarea clădirii într-o clasă de risc seismic și stabilirea necesității intervențiilor de reparare sau consolidare. Corelarea datelor de teren cu analiza structurală permite identificarea mecanismelor care controlează răspunsul real al construcției și fundamentarea unei strategii de intervenție adaptate. Etapele procesului de expertizare și criteriile de încadrare în clase de risc seismic sunt prezentate sintetic în Figura 2.3.




(a)




(b)

**Figura 2.3.** Determinarea indicatorului de risc seismic pentru construcțiile existente: (a) Etapele expertizei tehnice; (b) Clasele de risc seismic. (elaborare pe baza metodologiei de evaluare structurală prevăzute în P100-3/2019).

## 2.5. Materiale și sisteme utilizate la repararea și consolidarea clădirilor

În continuare, capitolul analizează materialele și sistemele utilizate în repararea și consolidarea clădirilor din beton armat. Intervențiile pot fi locale, atunci când urmăresc creșterea capacității portante sau ductilității unor elemente individuale, sau globale, atunci când modifică mecanismul structural de ansamblu. Sunt prezentate materiale și tehnologii precum mortarele și betoanele structurale, elementele metalice, materialele compozite pe bază de fibre și sistemele de ancorare post-instalate. O atenție deosebită este acordată interfeței dintre materialele existente și cele nou introduse, deoarece eficiența intervenției depinde de capacitatea acesteia de a transmite eforturile fără pierderi premature de aderență sau degradări locale.

## 2.6. Consolidarea la acțiuni seismice a clădirilor multietajate

Consolidarea seismică a clădirilor multietajate este analizată prin prisma influenței asupra comportării globale a structurii. Metodele clasice, precum cămășuirea elementelor, introducerea pereților structurali, contravântuirile metalice sau utilizarea materialelor compozite, pot îmbunătăți performanța elementelor sau a ansamblului structural, însă pot implica intervenții invazive, afectarea funcționalității și dificultăți de integrare în clădirile existente. În cazul clădirilor cu funcțiuni critice sau cu exploatare continuă, aceste limitări devin semnificative, motiv pentru care soluțiile de consolidare exterioară capătă o importanță tot mai mare. O sinteză a principalelor metode utilizate în prezent pentru consolidarea seismică a clădirilor existente este prezentată în Figura 2.4.

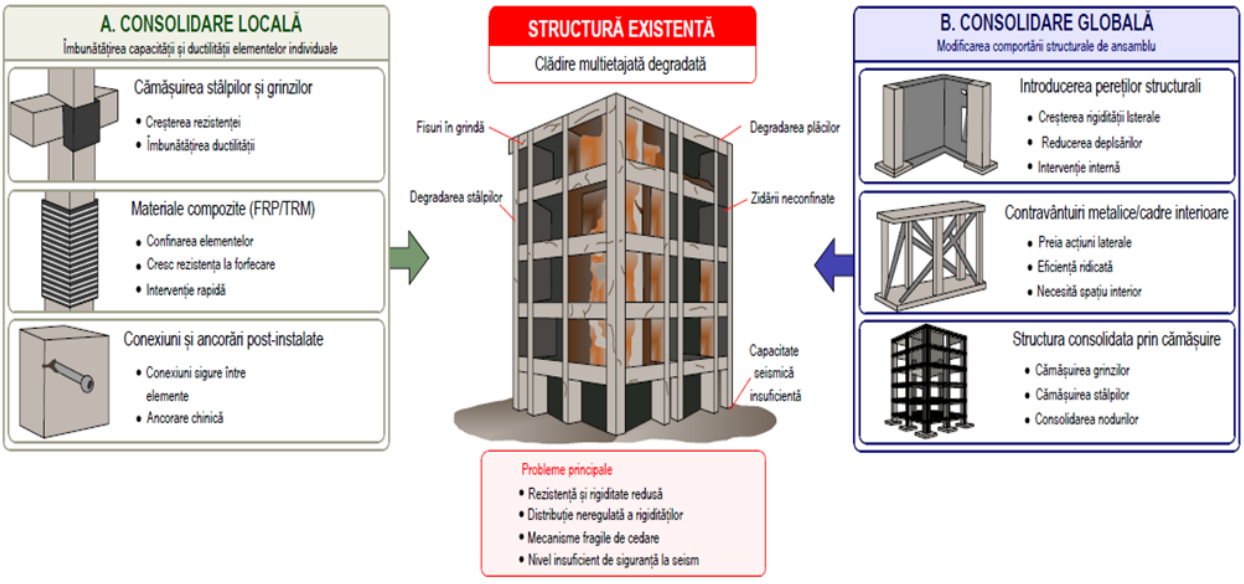



**Figura 2.4.** Principalele metode de consolidare seismică a clădirilor existente.
(elaborare pe baza clasificărilor metodelor de consolidare prezentate în FEMA (2018) și fib (2020)).

### 2.7. Concluzii

Sistemele structurale exterioare de tip exoschelet sunt evidențiate ca o direcție modernă de consolidare globală. Acestea permit amplasarea elementelor noi în exteriorul clădirii, preluarea unei părți importante din acțiunile laterale, creșterea rigidității globale și reducerea drifturilor de nivel, cu afectarea redusă a spațiilor interioare. Totuși, performanța acestor sisteme nu este determinată exclusiv de rigiditatea sau rezistența structurii adăugate, ci de modul în care aceasta interacționează cu structura existentă. Compatibilitatea deplasărilor, transferul eforturilor prin diafragme și comportarea elementelor de legătură devin condiții esențiale pentru funcționarea eficientă a ansamblului consolidat.

Analiza critică a literaturii evidențiază o limitare importantă a cercetărilor existente: răspunsul global al structurii consolidate și comportarea locală a conexiunilor sunt adesea tratate separat. Modelele structurale globale oferă informații privind deplasările, drifturile și eforturile de ansamblu, dar nu descriu întotdeauna suficient de detaliat mecanismele locale de transfer al eforturilor la nivelul interfețelor. Această problemă devine relevantă în special în cazul soluțiilor în care conectarea dintre structura existentă și exoschelet se realizează prin ancore post-instalate și prin diafragme de planșeu, unde distribuția solicitărilor are caracter tridimensional și depinde atât de răspunsul global al clădirii, cât și de rigiditatea locală a conexiunilor.

Prin urmare, Capitolul 2 nu are doar rolul de a prezenta stadiul actual al cercetării, ci și de a fundamenta necesitatea direcției abordate în teză. Analiza realizată arată că proiectarea rațională a sistemelor de consolidare exterioară trebuie să coreleze comportarea globală a structurii cu mecanismele locale de transfer al eforturilor. Această concluzie constituie baza conceptuală pentru capitolele următoare, în care sunt analizate sistemele de consolidare exterioare, comportarea experimentală și numerică a ancorărilor post-instalate, precum și metodologia de determinare și dimensionare a eforturilor de interfață.

.

# Capitolul 3

## CERCETĂRI PRIVIND SISTEMELE DE CONSOLIDARE EXTERIOARE

### 3.1.1. Noțiuni introductive privind sistemele de consolidare exterioare

Capitolul 3 analizează sistemele de consolidare structurală amplasate în exteriorul clădirilor existente, cu accent asupra principiilor de alcătuire, mecanismelor de interacțiune structurală și metodelor de analiză utilizate pentru evaluarea comportării acestora la acțiuni seismice. Interesul pentru aceste soluții a crescut semnificativ în ultimele decenii, pe fondul necesității de intervenție asupra unui fond construit extins, realizat în mare parte anterior introducerii reglementărilor antiseismice moderne, precum și al cerinței de realizare a lucrărilor de consolidare cu impact redus asupra funcționalității clădirilor aflate în exploatare.

Sistemele de consolidare exterioară se diferențiază de metodele tradiționale prin amplasarea elementelor structurale suplimentare în exteriorul anvelopei clădirii, reducând intervențiile asupra compartimentării interioare și permițând, în numeroase situații, menținerea funcționării construcției pe durata execuției. Din această categorie fac parte cadrele exterioare, sistemele de contravântuire, pereții structurali exteriori și sistemele continue de tip exoschelet. Clasificarea conceptuală a principalelor sisteme de consolidare exterioară este prezentată în Figura 3.1. Aceste soluții urmăresc creșterea rigidității laterale, reducerea deplasărilor seismice și redistribuirea eforturilor interne, putând fi integrate cu lucrări de reabilitare energetică și arhitecturală.

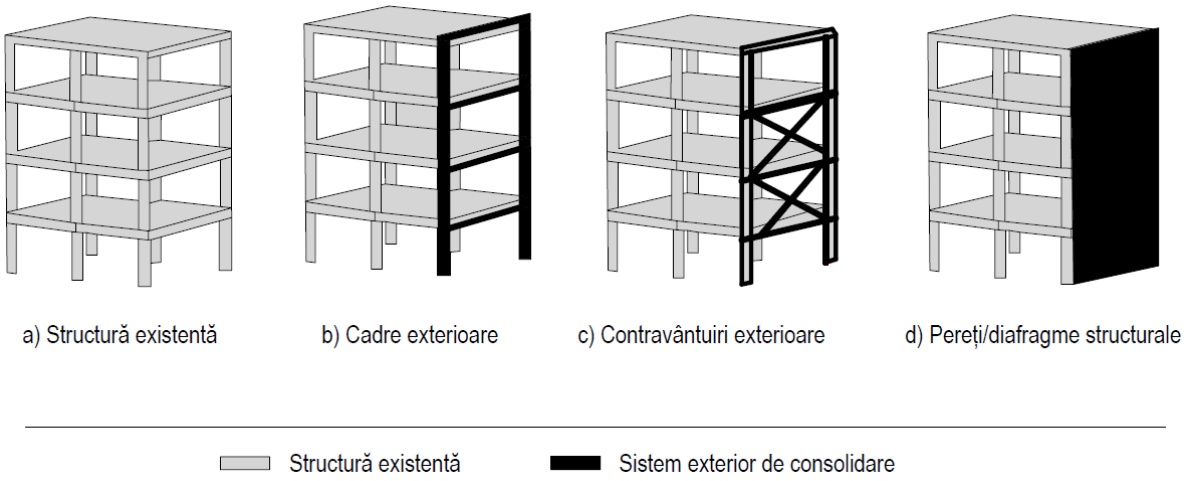



**Figura 3.1.** Clasificarea conceptuală a sistemelor de consolidare exterioare. (elaborare pe baza Takewaki et al. (2011) și Marini et al. (2017)).

### 3.2. Clasificarea sistemelor de consolidare exterioare

Diferența fundamentală dintre soluțiile exterioare locale și sistemele continue de tip exoschelet constă în modul de participare la mecanismul global de rezistență. În cazul cadrelor sau contravântuirilor exterioare cu caracter local, transferul eforturilor se realizează preponderent punctual, prin noduri sau elemente de legătură discrete, iar contribuția acestora la rigiditatea laterală globală rămâne limitată la zonele de conectare. În cazul exoscheletelor structurale, elementele noi sunt dispuse continuu pe înălțimea clădirii și sunt conectate sistematic la nivelul planșeelor, ceea ce permite mobilizarea lor în răspunsul global al structurii pe întreaga înălțime, nu doar în punctele discrete de racordare. În această configurație, diafragmele de planșeu au un rol determinant, deoarece asigură compatibilitatea deplasărilor și transmiterea forțelor între structura existentă și sistemul exterior la fiecare nivel. Această mobilizare continuă modifică semnificativ distribuția eforturilor în structura existentă, redistribuind o parte importantă a acțiunilor seismice către sistemul exterior și reducând solicitările din elementele structurale inițiale. Din punct de vedere al dimensionării, această diferență impune verificarea explicită a capacității diafragmelor de a prelua eforturile de interfață la fiecare nivel, spre deosebire de soluțiile locale, unde verificarea se

limitează la zona conexiunii punctuale. Principalele diferențe dintre cadrele exterioare locale și sistemele continue de tip exoschelet sunt sintetizate în Tabelul 3.1.

**Tabel 3.1.** Compararea sistemelor de consolidare exterioară: cadre locale vs. exoschelete structurale. (elaborare pe baza fib (2013), Pampanin (2012), Takeda et al. (2013)).

| ***Caracteristică*** | ***Cadre exterioare locale*** | ***Exoschelete structurale*** |
|---|---|---|
| *Domeniu de intervenție* | Local | Global |
| *Mod de lucru* | Punctual | Sistemic |
| *Transfer de eforturi* | Prin noduri discrete | Prin diafragme de planșeu |
| *Participare la acțiuni laterale* | Limitată | Semnificativă |
| *Efect asupra rigidității globale* | Redus | Major |
| *Redistribuirea eforturilor* | Locală | Globală |
| *Compatibilitate deformații* | Parțială | Ridicată |
| *Impact asupra funcționării clădirii* | Variabil | Redus (intervenții exterioare) |
| *Complexitate execuție* | Medie | Ridicată |
| *Eficiență seismică* | Moderată | Ridicată |

Capitolul evidențiază faptul că performanța unui sistem exterior de consolidare nu este determinată exclusiv de rigiditatea sau capacitatea portantă a elementelor nou introduse, ci depinde în mod direct de eficiența mecanismului de transfer al eforturilor la nivelul interfețelor structurale. Elementele de legătură, realizate frecvent prin armături post-instalate și sisteme de ancorare chimică sau mecanică, trebuie să transmită solicitări complexe, rezultate din combinații de eforturi axiale, tăietoare și momente. Această observație justifică necesitatea unei analize corelate la două niveluri: evaluarea răspunsului global al ansamblului consolidat și verificarea locală a conexiunilor dintre subsistemele structurale.

### 3.2.1. Sisteme de rigidizare exterioară prin cadre

Sistemele de consolidare exterioară sunt clasificate în funcție de configurația structurală, materialul utilizat și mecanismul de transfer al eforturilor. O primă categorie este reprezentată de cadrele structurale exterioare, alcătuite din elemente de tip grindă–stâlp dispuse pe fațadele clădirii existente. Acestea pot fi realizate din beton armat, oțel sau elemente prefabricate și sunt conectate la structura existentă prin elemente de legătură discrete sau prin intermediul diafragmelor de planșeu.

Cadrele exterioare pot contribui la creșterea rigidității laterale și la reducerea deplasărilor relative, însă eficiența lor este condiționată de rigiditatea conexiunilor și de capacitatea acestora de a asigura compatibilitatea deplasărilor între cele două sisteme structurale.

### 3.2.2. Sisteme de rigidizare exterioară prin contravântuiri

A doua categorie este constituită de sistemele de contravântuire exterioară, realizate de regulă din elemente metalice dispuse sub forme diagonale simple, tip V, tip X sau în configurații disipative. Aceste soluții prezintă avantajul masei reduse, al execuției rapide și al unei rigidități laterale ridicate, datorită mobilizării elementelor în efort axial. Totuși, transferul eforturilor se realizează în zone punctuale, ceea ce poate conduce la concentrarea solicitărilor la nivelul conexiunilor. În regim seismic, comportarea contravântuirilor este influențată de fenomene neliniare, precum flambajul elementelor comprimate sau plastificarea celor întinse, iar impactul arhitectural asupra fațadelor poate limita aplicabilitatea acestora în anumite situații.

### 3.2.3. Sisteme de rigidizare exterioară prin pereți structurali

A treia categorie este reprezentată de sistemele de rigidizare exterioară prin pereți structurali sau diafragme verticale. Acestea au un caracter continuu și sunt concepute pentru a prelua acțiunile laterale pe întreaga înălțime a construcției, dezvoltând un comportament de tip consolă verticală. Comparativ cu soluțiile prin cadre sau contravântuiri, pereții structurali exteriori permit o mobilizare mai eficientă a rigidității, o distribuție mai uniformă a eforturilor și un control superior al răspunsului global. Eficiența acestor sisteme depinde însă de capacitatea diafragmelor de planșeu și a conexiunilor locale de a transmite eforturile dintre structura existentă și sistemul exterior fără degradări semnificative.

Exoscheletele structurale sunt analizate ca o categorie particulară a sistemelor de consolidare exterioară, caracterizată prin continuitatea elementelor structurale pe înălțimea clădirii și prin participarea semnificativă la preluarea acțiunilor laterale. Prin amplasarea la exterior, acestea reduc impactul asupra funcționalității clădirii și permit integrarea consolidării cu intervenții asupra fațadei. În același timp, proiectarea lor este mai complexă, deoarece eficiența sistemului depinde de modul în care este asigurată conlucrarea dintre structura existentă și sistemul nou introdus. Performanța acestor sisteme nu este determinată exclusiv de rigiditatea proprie a exoscheletului, ci și de eficiența transferului eforturilor dintre acesta și structura existentă. Din acest motiv, proiectarea conexiunilor structurale și a interfețelor de legătură reprezintă o etapă esențială în dezvoltarea unei soluții de consolidare fiabile, capabile să asigure compatibilitatea deplasărilor și mobilizarea simultană a celor două subsisteme structurale. O colaborare insuficientă între exoschelet și construcția existentă poate reduce semnificativ eficiența intervenției, chiar și în cazul unui sistem exterior cu rigiditate ridicată. Pentru clădirile cu funcțiuni critice sau cu utilizare continuă, aceste soluții prezintă un potențial important, întrucât permit creșterea performanței

seismice fără intervenții majore asupra spațiului interior. Mecanismul conceptual de transfer al eforturilor dintre structura existentă și exoscheletul din beton armat este ilustrat în Figura 3.2.

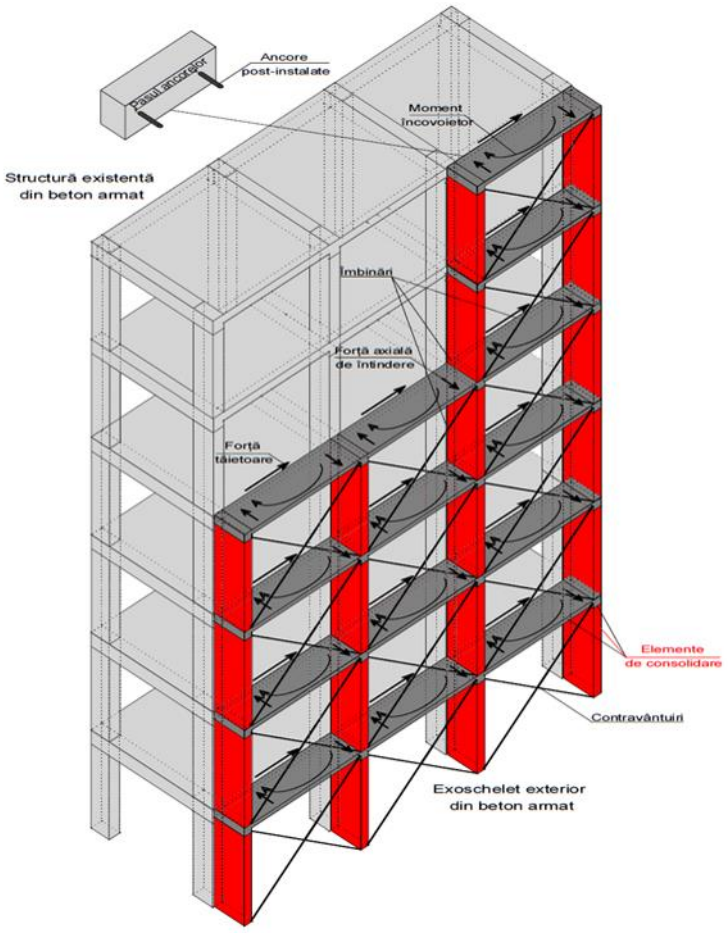



**Figura 3.2.** Schema conceptuală a mecanismului de transfer al eforturilor între structura existentă și exoscheletul din beton armat, prin intermediul ancorelor post-instalate și al diafragmelor de planșeu. (Bizu et al. (2026)).

### 3.3. Avantajele sistemelor de consolidare exterioare

Avantajele sistemelor de consolidare exterioară sunt analizate atât din punct de vedere structural, cât și funcțional. Acestea includ reducerea intervențiilor asupra structurii existente, posibilitatea menținerii clădirii în exploatare pe durata lucrărilor, creșterea rigidității laterale, reducerea deplasărilor seismice și integrarea cu soluții de modernizare energetică sau arhitecturală. În același timp, capitolul subliniază că aceste avantaje pot fi valorificate doar dacă mecanismele de transfer al eforturilor sunt proiectate corespunzător, iar interfețele structurale sunt dimensionate astfel încât să asigure compatibilitatea dintre subsistemul existent și cel exterior. Totodată, eficiența soluției depinde de corelarea etapelor de proiectare cu cerințele de execuție, astfel încât performanțele estimate prin calcul să poată fi obținute și în condițiile reale de punere în operă. Schema mecanismului local de transfer al eforturilor la nivelul diafragmei de planșeu este prezentată în Figura 3.3.

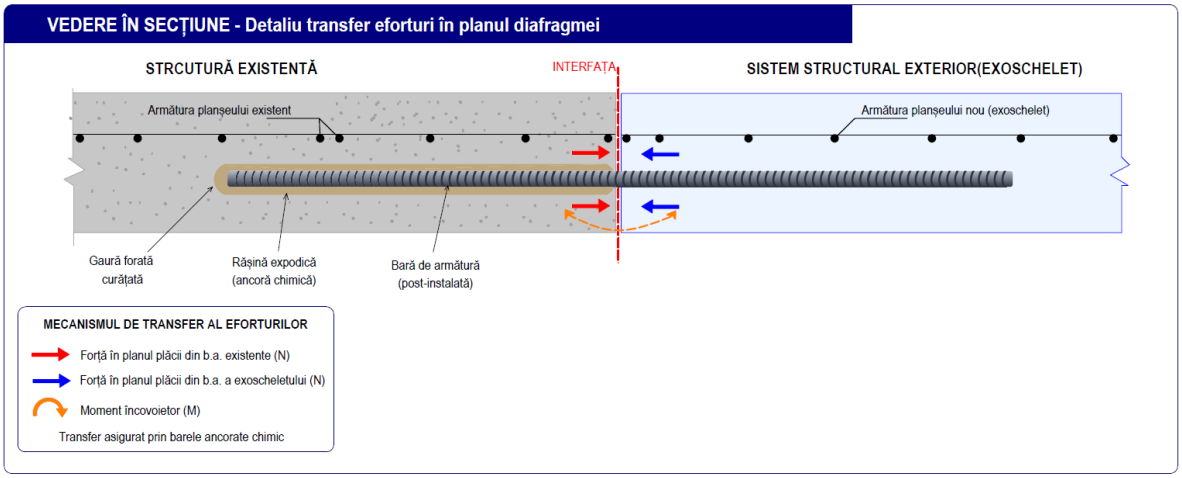



**Figura 3.3.** Schema conceptuală a mecanismului local de transfer al eforturilor în planul diafragmei de planșeu, la interfața dintre structura existentă și sistemul structural exterior. (elaborare pe baza EN 1998-1 și FEMA 450).

### 3.4. Dezavantajele sistemelor de consolidare exterioare

Limitările acestor sisteme sunt legate în principal de complexitatea conexiunilor structurale, incertitudinile privind caracteristicile construcției existente, modificarea răspunsului dinamic global și integrarea arhitecturală a elementelor nou introduse. În lipsa unor conexiuni adecvate, sistemul exterior poate funcționa parțial independent, reducând eficiența intervenției. De asemenea, variabilitatea proprietăților materialelor existente, lipsa documentației inițiale și distribuția neuniformă a rigidității pot influența semnificativ modul de transfer al eforturilor și comportarea globală a ansamblului consolidat.

### 3.5.6. Analiză comparativă a metodelor de analiză structurală

A treia categorie este reprezentată de sistemele de rigidizare exterioară prin pereți structurali sau diafragme verticale. Acestea au un caracter continuu și sunt concepute pentru a prelua acțiunile laterale pe întreaga înălțime a construcției, dezvoltând un comportament de tip consolă verticală. Comparativ cu soluțiile prin cadre sau contravântuiri, pereții structurali exteriori permit o mobilizare mai eficientă a rigidității, o distribuție mai uniformă a eforturilor și un control superior al răspunsului global. Eficiența acestor sisteme depinde însă de capacitatea diafragmelor de planșeu și a conexiunilor locale de a transmite eforturile dintre structura existentă și sistemul exterior fără degradări semnificative.

Alegerea metodei de analiză trebuie realizată în funcție de obiectivele urmărite și de nivelul de detaliere necesar pentru evaluarea comportării structurale. În practică, metodele de analiză nu se exclud reciproc, ci sunt utilizate în mod complementar, fiecare furnizând informații specifice privind răspunsul structurii. Astfel, rezultatele obținute prin analiza globală pot constitui baza pentru evaluarea mecanismelor locale de transfer al eforturilor și pentru dimensionarea conexiunilor structurale dintre sistemul existent și cel de consolidare.

Capitolul prezintă și metodele de analiză structurală utilizate pentru evaluarea clădirilor existente și a sistemelor de consolidare exterioară. Metoda statică echivalentă oferă o abordare simplificată, adecvată structurilor regulate, dar are limitări în cazul sistemelor complexe. Metoda spectrului de răspuns modal permite evaluarea caracteristicilor dinamice ale structurii și a influenței sistemului exterior asupra perioadelor proprii, deplasărilor și distribuției eforturilor. Analiza statică neliniară de tip pushover oferă informații asupra mecanismelor de plastificare și rezervelor de rezistență, în timp ce analiza time-history permite investigarea detaliată a răspunsului structural în timp, dar necesită modele complexe și accelerograme adecvate. O comparație sintetică a principalelor metode de analiză structurală utilizate în evaluarea comportării seismice este prezentată în Tabelul 3.2.

**Tabel 3.2.** Analiza comparativă a metodelor de analiză structurală utilizate în evaluarea comportării seismice.

| ***Metodă de analiză*** | ***Tip analiză*** | ***Avantaje*** | ***Limitări*** | ***Domeniu de aplicabilitate*** |
|---|---|---|---|---|
| *Analiză liniară statică* | statică | simplă, rapidă | nu surprinde neliniarități | evaluări preliminare |
| *Analiză modală spectrală* | dinamică liniară | consideră moduri proprii | răspuns elastic | proiectare curentă |
| *Analiză pushover* | statică neliniară | evidențiază mecanisme de cedare | nu surprinde interacțiuni complexe | evaluare performanță |
| *Analiză time-history* | dinamică neliniară | cea mai realistă | complexă, costisitoare | evaluarea avansată a performanței seismice |

### 3.6. Concluzii

În cadrul cercetării, analiza comportării sistemului exterior de consolidare este fundamentată pe modelarea structurală tridimensională și pe utilizarea metodei spectrului de răspuns modal, completată prin post-procesarea rezultatelor prin secțiuni de tăiere definite local la nivelul interfețelor structurale. Această abordare permite evaluarea răspunsului global al structurii consolidate și, în același timp, extragerea eforturilor relevante pentru dimensionarea elementelor de legătură. Prin integrarea exclusivă a elementelor implicate direct în transferul de efort, metoda Section Cut permite evitarea includerii unor contribuții nespecifice mecanismului analizat.

Concluziile capitolului arată că sistemele de consolidare exterioară, în special exoscheletele structurale, reprezintă soluții cu potențial ridicat pentru îmbunătățirea performanței seismice a clădirilor existente, mai ales în cazul construcțiilor care trebuie menținute în exploatare. Eficiența acestora depinde însă de capacitatea conexiunilor de a asigura transferul controlat al eforturilor între structura existentă și sistemul nou introdus. Din acest motiv, Capitolul 3 construiește cadrul conceptual și metodologic necesar pentru capitolele următoare, în care mecanismele locale de transfer sunt analizate experimental, numeric și aplicativ în cadrul unui studiu de caz.

# Capitolul 4

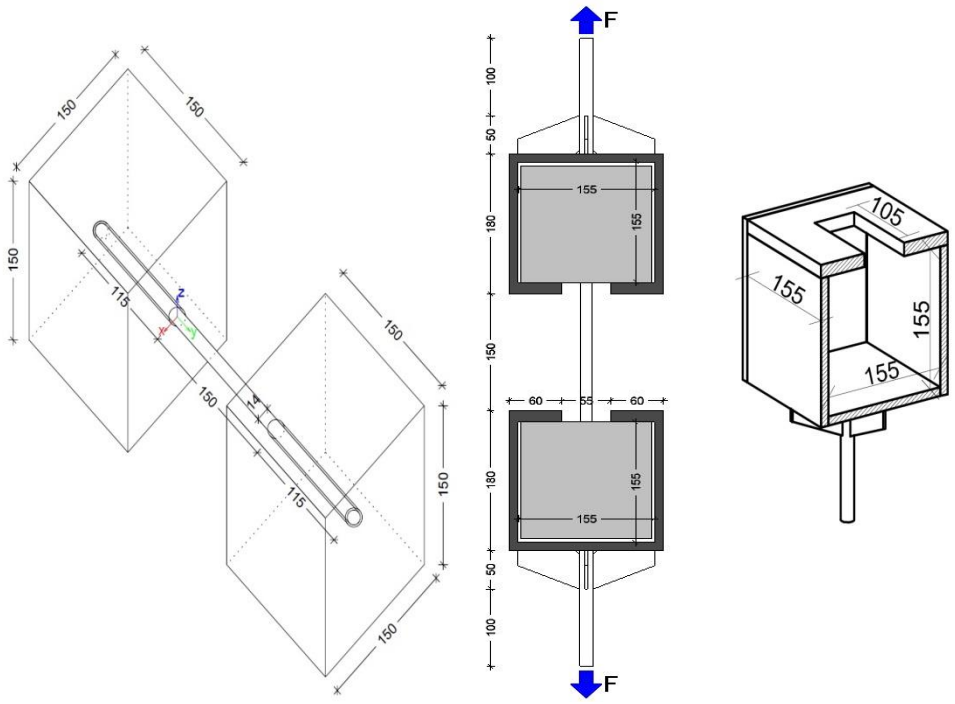
# REZULTATE ALE PROGRAMULUI EXPERIMENTAL PRIVIND SISTEMELE DE ANCORARE A STRUCTURILOR EXTERIOARE DE CONSOLIDARE

## 4.1. Introducere

Capitolul 4 prezintă programul experimental realizat pentru investigarea comportării sistemelor de ancorare utilizate la conectarea structurilor existente din beton armat cu sistemele exterioare de consolidare. Studiul urmărește înțelegerea mecanismelor locale de transfer al eforturilor la nivelul interfețelor structurale, acestea având un rol determinant în asigurarea conlucrării dintre structura existentă și exoschelet. În cadrul soluțiilor de consolidare exterioară, elementele de legătură trebuie să transmită eforturile între cele două subsisteme structurale și să asigure compatibilitatea deplasărilor, motiv pentru care comportarea lor influențează direct eficiența intervenției.

## 4.2. Construirea și instrumentarea modulelor de îmbinare

Configurația experimentală adoptată reprezintă o extindere a încercării clasice de smulgere către o situație specifică intervențiilor de consolidare exterioară. Au fost investigate module de îmbinare alcătuite din două cuburi de beton de 150 × 150 × 150 mm, conectate printr-o bară de armătură BST500S cu diametrul Ø14 mm. Lungimea de ancorare a fost de aproximativ 115 mm la fiecare capăt, corespunzătoare unui raport lungime/diametru de aproximativ 8,2, valoare care asigură dezvoltarea unui mecanism de transfer reprezentativ pentru condițiile de montaj din practica de consolidare. Ancorarea s-a realizat fie monolit, prin introducerea barei în betonul proaspăt, fie post-instalat, prin forarea betonului întărit și utilizarea unui adeziv structural. Pentru ancorarea adezivă au fost realizate găuri cu diametrul de 18 mm, corespunzător unui joc radial de 2 mm față de diametrul barei, în care a fost injectat adezivul, în conformitate cu procedura tehnică a producătorului. Configurația experimentală a modulului de îmbinare utilizat în cadrul programului experimental este prezentată în Figura 4.1.




(a) (b) (c)

**Figura 4.1.** Configurația experimentală a modulului de îmbinare utilizat pentru investigarea barelor ancorate la ambele capete. a) bară de oțel ancorată în cuburi de beton; b) secțiune longitudinală a ansamblului experimental; c) manșoane metalice de protecție. (Bizu et al., 2025).

Spre deosebire de încercările clasice de tip pull-out, care analizează bare ancorate într-un singur element de beton, conexiunile din sistemele cu exoschelet solicită aceeași bară simultan în structura existentă și în elementul nou introdus. Din acest motiv, cercetarea a utilizat o configurație experimentală cu ancorare bilaterală, reproducând mai fidel acest mecanism de interacțiune; principalele tipuri de ancorare investigate sunt ilustrate în Figura 4.2.



**Figura 4.2.** Tipuri de ancorare investigate în cadrul investigațiilor experimentale: ancorare monolită și ancorare adezivă.

Matricea experimentală a inclus șase configurații distincte, notate A–F, definite prin combinarea tipului de ancorare și a clasei betonului utilizat pentru cele două blocuri. Configurațiile A, C și E au fost realizate cu ancorare adezivă la ambele capete ale barei, iar configurațiile B, D și F au utilizat o soluție mixtă, cu un capăt ancorat adeziv și celălalt monolit. Betonul corespunzător structurii existente a fost menținut constant, fiind asociat clasei C30/37, în timp ce betonul corespunzător elementului nou a variat între C25/30, C30/37 și C35/45. Această organizare a permis evaluarea influenței tipului de ancorare și a rezistenței betonului asupra capacității portante și asupra modului de cedare. Caracteristicile modulelor experimentale investigate sunt sintetizate în Tabelul 4.1.

**Tabel 4.1.** Caracteristicile modulelor experimentale utilizate în analiza comportării la smulgere. (Bizu et al., 2025).

| ***Tip probă*** | ***Sistem de îmbinare*** | ***Tip de încastrare*** | | ***Clasa estimată de rezistență a betonului*** | | ***Rezistență la compresiune a betonului $f_{ck}$ (MPa)*** | | ***Modulul de elasticitate a betonului E (GPa)*** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ***Bară Oțel /epruveta beton R*** | ***Bară Oțel /epruveta beton N*** | ***Epruveta R*** | ***Epruveta N*** | ***Epruveta R*** | ***Epruveta N*** | ***Epruveta R*** | ***Epruveta N*** |
| *A* | Simetrică | Ancoraj chimic | Ancoraj chimic | C30/37 | C30/37 | 41,1 | 41,1 | 33 | 33 |
| *B* | Asimetrică | Ancoraj chimic | Monolit | C30/37 | C30/37 | 41,1 | 41,1 | 33 | 33 |
| *C* | Simetrică | Ancoraj chimic | Ancoraj chimic | C30/37 | C25/30 | 41,1 | 34,3 | 33 | 31 |
| *D* | Asimetrică | Ancoraj chimic | Monolit | C30/37 | C25/30 | 41,1 | 34,3 | 33 | 31 |
| *E* | Simetrică | Ancoraj chimic | Ancoraj chimic | C30/37 | C35/45 | 41,1 | 50,2 | 33 | 34 |
| *F* | Asimetrică | Ancoraj chimic | Monolit | C30/37 | C35/45 | 41,1 | 50,2 | 33 | 34 |

Încercările au fost realizate cu o presă hidraulică servo-controlată WAW-600E (capacitate maximă 600 kN), încărcarea fiind aplicată cvasi-static prin controlul deplasării până la cedarea sistemului de ancorare. Au fost monitorizate continuu forța aplicată, deplasarea relativă dintre elementele conectate și evoluția mecanismului de cedare, inclusiv în domeniul post-critic, ceea ce a permis determinarea capacității portante maxime, a rigidității și a ductilității sistemului. Câmpul de tensiuni dezvoltat s-a concentrat în zona interfeței bară–adeziv–beton, prin interacțiunea celor două zone de ancorare, reproducând fidel condițiile de solicitare specifice conexiunilor din sistemele de

consolidare cu exoschelet și oferind o bază reprezentativă pentru validarea modelării numerice ulterioare. Configurația experimentală utilizată în timpul încercărilor este prezentată în Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Vederi reprezentative ale configurației experimentale utilizate pentru testarea probelor în presa hidraulică servo-controlată.

### 4.3.1. Beton

Materialele utilizate au fost selectate astfel încât să reproducă situații întâlnite în lucrările de consolidare structurală. Betonul utilizat a fost realizat în clasele C25/30, C30/37 și C35/45.

### 4.3.2. Oțel pentru armături

Armătura utilizată a fost din oțel BST500S, cu diametrul barei de Ø14 mm.

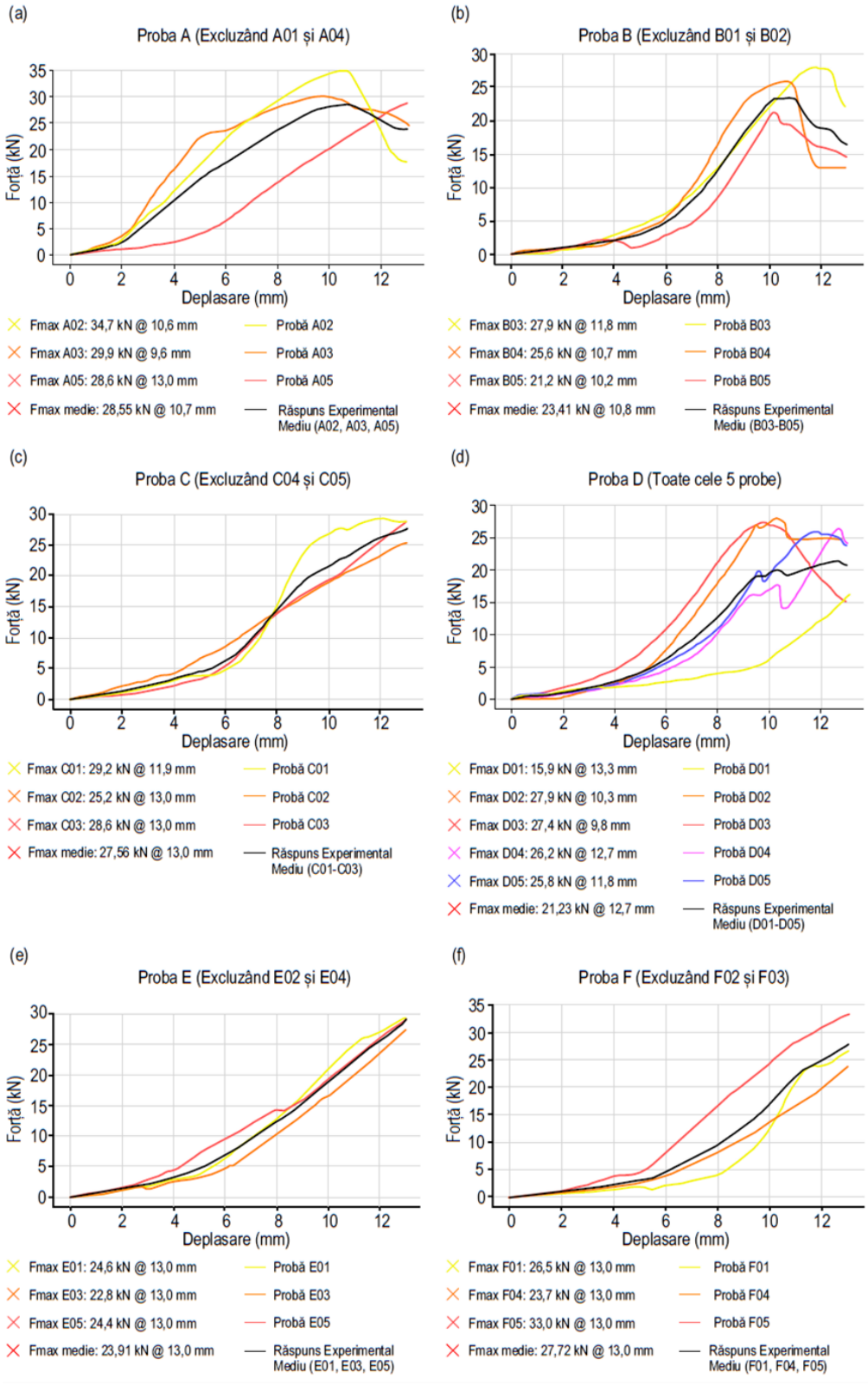
### 4.3.3. Adezivul structural utilizat pentru ancorare

Ancorarea post-instalată a fost realizată cu adeziv structural bicomponent pe bază de rășină epoxi-acrilică, mecanismul de transfer al eforturilor fiind condiționat de rezistența betonului, geometria barei și calitatea interfeței dintre componente, motiv pentru care respectarea procedurii de instalare a fost o condiție determinantă pentru un mecanism de transfer reprezentativ.

### 4.4.1. Curbele forță–deplasare

Rezultatele experimentale au fost analizate prin curbele forță–deplasare obținute pentru fiecare configurație. Aceste curbe evidențiază o fază inițială cu rigiditate ridicată, asociată mobilizării aderenței dintre bară, adeziv și beton, urmată de o zonă de degradare progresivă, în care creșterea încărcării conduce la dezvoltarea fisurilor și la pierderea parțială a aderenței. În apropierea forței maxime, comportarea este controlată de evoluția fisurilor în zona de ancorare și de redistribuirea tensiunilor în masa betonului din jurul barei. Curbele medii obținute permit

compararea rigidității inițiale, a capacității portante maxime și a comportării post-cedare pentru fiecare configurație. Curbele forță–deplasare corespunzătoare tuturor configurațiilor experimentale sunt prezentate în Figura 4.4.




(a) (b) (c) (d)

**Figura 4.4.** Curbe forță–deplasare pentru configurațiile experimentale A–F, incluzând curbele medii corespunzătoare fiecărei serii. (Bizu et al., 2025).

### 4.4.2. Capacitatea portantă a sistemelor de ancorare

Valorile medii ale forței maxime de smulgere au evidențiat influența tipului de ancorare asupra capacității portante. Pentru probele realizate cu aceeași clasă de beton în ambele blocuri, configurația cu ancorare adezivă la ambele capete a atins o forță medie de aproximativ 28,55 kN, în timp ce configurația mixtă a înregistrat aproximativ 23,41 kN. Această diferență indică faptul că mecanismul adeziv–adeziv a permis mobilizarea mai eficientă a zonelor de ancorare și o distribuție mai favorabilă a tensiunilor de aderență. Totuși, configurațiile cu ancorare adezivă bilaterală trebuie interpretate ca situații experimentale favorabile, nu ca soluții constructive direct aplicabile în șantier, unde una dintre zonele de ancorare poate fi realizată monolit în elementul nou turnat. Valorile medii ale forței maxime de smulgere obținute pentru toate configurațiile experimentale sunt sintetizate în Tabelul 4.2.

**Tabel 4.2.** Valori medii ale forței maxime de smulgere pentru configurațiile experimentale investigate. (Bizu et al., 2025).

| ***Tip probă*** | ***Tip încastrare*** | ***Rezultate obținute experimental*** | |
|---|---|---|---|
| | | ***Forță maximă [kN]*** | ***Deplasare maximă [mm]*** |
| *A* | Simetrică | 28,55 | 10,70 |
| *B* | Asimetrică | 23,41 | 10,80 |
| *C* | Simetrică | 27,56 | 13,00 |
| *D* | Asimetrică | 21,23 | 12,70 |
| *E* | Simetrică | 23,91 | 13,00 |
| *F* | Asimetrică | 27,72 | 13,00 |

Pentru interpretarea mecanismului de transfer al eforturilor a fost utilizat un model analitic simplificat, bazat pe evaluarea tensiunilor tangențiale dezvoltate la interfața bară–adeziv–beton și pe estimarea lungimii efective de transfer. Analiza a arătat că tensiunile de aderență nu sunt distribuite uniform pe întreaga lungime de ancorare, ci se concentrează pe o zonă redusă, în care se inițiază degradarea aderenței și formarea fisurilor. Conceptul de lungime critică de ancorare a permis o interpretare mai realistă a mecanismului de smulgere, evitând supraestimarea capacității portante prin ipoteza unei distribuții uniforme a tensiunilor.

### 4.4.3. Moduri caracteristice de cedare

Modurile de cedare observate au fost controlate în principal de degradarea progresivă a aderenței și de fisurarea betonului în zona de ancorare. În majoritatea probelor, cedarea nu s-a produs prin curgerea sau ruperea barei de armătură, ci prin mecanisme asociate betonului și

interfeței de ancorare. Au fost identificate fenomene de smulgere, fisurare locală, desprindere parțială a betonului și formare a conului de cedare. Aceste moduri de cedare confirmă faptul că performanța sistemului este guvernată de interacțiunea dintre bară, adeziv și beton, precum și de influența reciprocă dintre cele două zone de ancorare ale aceleiași bare.

### 4.5. Concluzii

Caracterul original al programului experimental constă în adaptarea încercării clasice de smulgere la o configurație bilaterală de ancorare, specifică îmbinărilor dintre structurile existente și sistemele exterioare de consolidare. Această configurație permite evidențierea interacțiunii dintre cele două capete ancorate ale barei și oferă o bază experimentală pentru interpretarea mecanismelor locale de transfer al eforturilor. Rezultatele obținute nu au doar rol descriptiv, ci constituie baza pentru validarea modelării numerice realizate ulterior și pentru fundamentarea dimensionării sistemelor de ancorare utilizate în studiul de caz.

Prin corelarea rezultatelor experimentale cu analiza numerică și cu modelarea structurală globală, Capitolul 4 constituie o etapă metodologică esențială a cercetării. Programul experimental asigură legătura dintre scara locală a fenomenului de ancorare și scara globală a comportării structurii consolidate. Capacitatea portantă determinată experimental permite evaluarea realistă a conexiunilor structurale și susține utilizarea ulterioară a eforturilor extrase prin metoda Section Cut pentru dimensionarea grupurilor de ancore. Astfel, Capitolul 4 oferă baza experimentală necesară pentru validarea modelelor numerice și pentru aplicarea metodologiei integrate de proiectare prezentate în capitolele următoare.

## Capitolul 5

## MODELAREA NUMERICĂ A COMPORTAMENTULUI STRUCTURAL LA SMULGERE A SISTEMELOR DE ANCORARE

### 5.1. Prezentare generală a metodei FEA

Capitolul 5 prezintă modelarea numerică a comportamentului la smulgere al sistemelor de ancorare investigate experimental în Capitolul 4, utilizând metoda elementelor finite. Scopul principal al acestei etape este aprofundarea mecanismelor locale de transfer al eforturilor dintre bară, adeziv și beton, precum și validarea unui model numeric capabil să reproducă răspunsul observat experimental. Dacă programul experimental a permis caracterizarea globală a sistemelor analizate, prin curbe forță–deplasare, valori ale forței maxime și moduri de cedare, modelarea numerică oferă informații suplimentare privind distribuția tensiunilor, evoluția deformațiilor și inițierea mecanismelor locale de degradare.

Metoda elementelor finite reprezintă un instrument adecvat pentru analiza fenomenelor mecanice complexe care apar în zona ancorajelor post-instalate, deoarece permite investigarea unor

aspecte dificil de măsurat direct în laborator, precum concentrarea tensiunilor de aderență, fisurarea betonului, degradarea progresivă a interfeței și formarea conului de smulgere. În cazul configurației analizate în teză, complexitatea este amplificată de faptul că bara de armătură este ancorată simultan în două blocuri de beton distincte, ceea ce generează un mecanism de transfer diferit față de încercările clasice de tip pull-out. Modelarea numerică devine astfel o etapă complementară necesară pentru interpretarea rezultatelor experimentale și pentru extinderea acestora către aplicații structurale reale.

### 5.2. Modelarea numerică a comportamentului structural la smulgere a modulelor de îmbinare

Modelul numeric tridimensional a fost dezvoltat în ANSYS Workbench 2022 R2, utilizând modulul Explicit Dynamics, adecvat simulării fenomenelor neliniare și a degradării progresive a materialelor. Geometria modelului a reprodus configurația experimentală, incluzând cele două blocuri de beton, bara de armătură și stratul de adeziv utilizat pentru ancorare. Blocurile de beton au avut dimensiunile de 150 × 150 × 150 mm, iar bara de armătură a fost modelată cu diametrul Ø14 mm, în concordanță cu programul experimental. Discretizarea a fost realizată cu elemente finite solide tridimensionale, fiind utilizate aproximativ 76.500 noduri și 65.000 elemente finite. Mesh-ul a fost rafinat local în zona de ancorare, unde apar gradienții maximi de tensiune și deformație. Discretizarea geometrică și configurația generală a modelului numeric utilizat în analiza prin elemente finite sunt prezentate în Figurile 5.1 și 5.2.

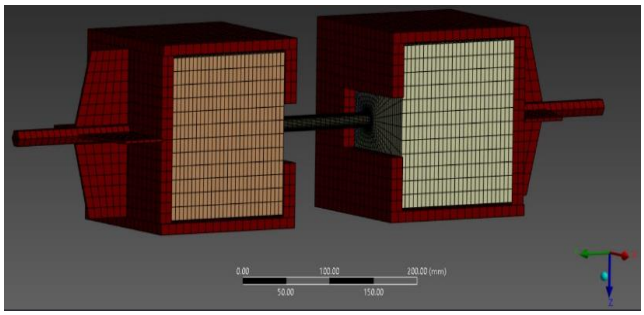


**Figura 5.1.** Discretizarea geometrică a modelului tridimensional cu elemente finite (Bizu et al., 2025).

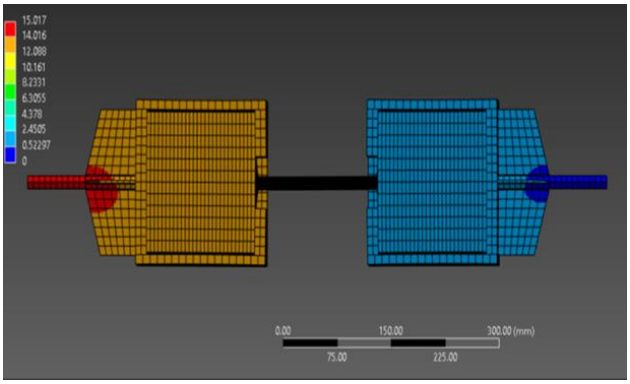



**Figura 5.2.** Configurația modelului numeric utilizat în analiza prin elemente finite (Bizu et al., 2025).

### 5.3.2. Proprietățile materialelor utilizate în modelare

Proprietățile materialelor au fost definite pe baza datelor experimentale și a informațiilor tehnice disponibile. Betonul a fost modelat cu un comportament neliniar, capabil să surprindă fisurarea, degradarea progresivă și comportarea fragilă la întindere. Pentru a reproduce starea de microfisurare corespunzătoare probelor experimentale, modulul de elasticitate al betonului a fost redus față de valoarea corespunzătoare betonului nefisurat. Adezivul structural a fost considerat cu comportare elastică, ipoteză justificată de faptul că în încercările experimentale cedarea a fost controlată de beton și nu de degradarea adezivului. Bara de armătură a fost modelată ca material elastic–plastic, însă rezultatele au confirmat menținerea acesteia în domeniul elastic pe toată durata solicitării. Alegerea acestor modele constitutive urmărește reproducerea cât mai fidelă a mecanismelor de transfer al eforturilor observate experimental și evitarea introducerii unor mecanisme de cedare care nu au fost evidențiate în cadrul încercărilor. În acest mod, răspunsul numeric este controlat de aceleași fenomene fizice care au guvernat comportarea probelor experimentale, ceea ce permite o comparație directă între rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare. Totodată, această strategie de modelare contribuie la creșterea gradului de încredere în rezultatele numerice și în utilizarea modelului pentru interpretarea distribuției tensiunilor și extinderea analizei la configurații care nu au fost investigate experimental. Proprietățile mecanice ale betonului utilizate în modelarea numerică sunt sintetizate în Tabelul 5.1.

**Tabel 5.1.** Proprietățile mecanice ale betonului utilizate în modelarea numerică cu elemente finite. (Bizu et al., 2025).

| ***Proprietățile materialelor*** | ***Beton C25/30*** | ***Beton C30/37*** | ***Beton C35/45*** |
|---|---|---|---|
| *Densitate [kg/m$^3$]* | 2400 | 2400 | 2400 |
| *Rezistență la compresiune* $f_{ck,cil}=0,8f_{ck,cub}$ *[MPa]* | 27,44 | 32,88 | 40,16 |
| *Rezistență la tracțiune* $f_{ctm}=0.3(f_{ck,cil})^{2/3}$ *[MPa]* | 2,73 | 3,08 | 3,52 |
| *Rezistență la forfecare* $f_{vk}=(f_{ck,cil})^{1/2}$ *[MPa]* | 5,23 | 5,73 | 6,34 |
| *Coeficientul lui Poisson* | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| *Modul de elasticitate redus [GPa]* | 12,917 | 13,750 | 14,167 |
| *Deformația minimă la rupere* | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

### 5.3.3. Condiții de rezemare și încărcare

Condițiile de rezemare și încărcare au fost definite astfel încât să reproducă încercările experimentale. Unul dintre blocurile de beton a fost fixat prin restricționarea gradelor de libertate, iar asupra celuilalt bloc a fost aplicată o deplasare controlată. Această metodă de încărcare a permis obținerea curbelor forță–deplasare și o comparație directă cu rezultatele experimentale.

### 5.3.4. Definirea contactelor și ipoteze de modelare

Contactele dintre bară, adeziv și beton au fost definite de tip bonded, presupunând aderență perfectă între componente. Această ipoteză reprezintă o simplificare, dar este compatibilă cu observațiile experimentale, unde mecanismul de cedare a fost guvernat predominant de fisurarea și smulgerea betonului, nu de cedarea prematură a interfeței adezive.

### 5.3.5. Analiza stării de tensiuni și deformații

Analiza stării de tensiuni și deformații a evidențiat distribuția neuniformă a solicitărilor în zona de ancorare. Valorile maxime ale tensiunilor s-au concentrat în vecinătatea barei și a interfeței adeziv–beton, confirmând rolul critic al acestei zone în mecanismul de transfer al eforturilor. Pe măsură ce deplasarea impusă a crescut, zonele cu tensiuni principale de întindere s-au extins către suprafața liberă a blocului de beton, conturând mecanismul caracteristic de cedare prin con de smulgere. Modelul numeric a reprodus astfel mecanismul observat experimental, în care cedarea este asociată fisurării betonului și pierderii capacității locale de transfer a eforturilor.

Un rezultat important al modelării numerice îl constituie confirmarea faptului că bara de armătură nu atinge limita de curgere, mecanismul de cedare fiind controlat de comportarea betonului și de interacțiunea bară–adeziv–beton. Pentru configurațiile cu ancorare bilaterală, modelul a evidențiat o distribuție relativ echilibrată a eforturilor între cele două zone de ancorare, ceea ce explică o mobilizare mai favorabilă a capacității sistemului față de ancorajele unilaterale. Această observație susține concluziile experimentale privind influența configurației de ancorare asupra capacității portante și asupra modului de cedare.

## 5.4. Comparații între modelarea numerică și încercările experimentale

Validarea modelului numeric a fost realizată prin comparația cu rezultatele experimentale. Rezultatele FEM au fost evaluate atât cantitativ, prin valorile forței maxime de smulgere, cât și calitativ, prin forma curbelor forță–deplasare și prin modurile de cedare obținute. Modelul numeric a reprodus satisfăcător tendințele generale observate experimental, inclusiv diferențele dintre configurațiile cu ancorare adezivă bilaterală și cele mixte. Pentru configurația A, de exemplu, rezultatele experimentale au indicat o forță maximă medie de aproximativ 28,55 kN, iar modelarea numerică a condus la o valoare de aproximativ 32,30 kN. Diferențele observate indică o ușoară tendință de supraestimare a capacității portante de către modelul numeric, aspect explicabil prin

ipotezele simplificatoare privind contactele și comportarea materialelor. Rezultatele obținute prin simulările numerice pentru toate configurațiile investigate sunt sintetizate în Tabelul 5.2.

**Tabel 5.2.** Rezultate ale simulărilor numerice FEM corespunzătoare încercărilor experimentale (Bizu et al., 2025).

| ***Tip probă*** | ***Rezultate obținute prin modelare numerică cu elemente finite (FEM)*** | |
|---|---|---|
| | ***Forță maximă [kN]*** | ***Deplasare maximă [mm]*** |
| *A* | 32,30 | 12,876 |
| *B* | 24,70 | 9,438 |
| *C* | 32,50 | 12,876 |
| *D* | 25,10 | 9,526 |
| *E* | 32,50 | 12,876 |
| *F* | 31,30 | 11,450 |

Comparația dintre rezultatele experimentale și cele numerice a arătat că abaterile sunt mai mari în cazul configurațiilor cu ancorare adezivă bilaterală și mai reduse pentru configurațiile mixte. Aceste diferențe sunt influențate de dificultatea reproducerii exacte a condițiilor de aderență la interfață, de variabilitatea inerentă a încercărilor experimentale și de simplificările adoptate în definirea contactelor bonded. Din punct de vedere al deplasărilor la cedare, modelul numeric a furnizat valori situate în intervale comparabile cu cele experimentale, confirmând capacitatea acestuia de a reproduce rigiditatea globală și nivelul de deformare al sistemului. Comparația dintre valorile rezistenței la smulgere determinate experimental și cele obținute prin modelare numerică este ilustrată în Figura 5.3.

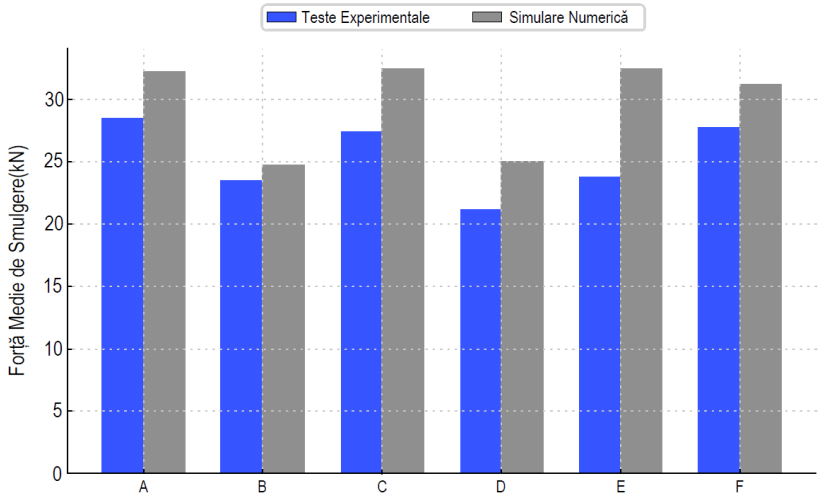



**Figura 5.3.** Studiu comparativ al valorilor medii ale rezistenței la smulgere determinate experimental și prin modelare numerică pentru îmbinările oțel–beton. (Bizu et al., 2025).

Din punct de vedere calitativ, modelul numeric a reprodus mecanismul principal de cedare observat experimental, caracterizat prin formarea conului de smulgere în beton și dezvoltarea progresivă a fisurilor în zona de ancorare. Zonele de concentrare a tensiunilor identificate în simulări corespund regiunilor în care s-au observat experimental fisuri și degradări locale. Această concordanță confirmă validitatea ipotezelor de modelare pentru scopul cercetării, chiar dacă modelul nu reproduce în totalitate fenomene locale precum microalunecarea, degradarea progresivă a adezivului sau neomogenitățile betonului.

### 5.5. Concluzii

Capitolul evidențiază și limitele modelării numerice adoptate. Definirea contactelor ca bonded conduce la o reprezentare idealizată a interfeței, iar considerarea adezivului cu comportare elastică simplifică fenomenele reale de degradare. De asemenea, modelul nu include imperfecțiuni de execuție, variații locale ale proprietăților materialelor sau neuniformități ale găurilor de ancorare, factori care pot influența rezultatele experimentale. Cu toate acestea, corelarea satisfăcătoare dintre răspunsul numeric și cel experimental confirmă că modelul este adecvat pentru interpretarea mecanismelor locale de transfer al eforturilor.

Prin rezultatele obținute, Capitolul 5 demonstrează că modelarea prin elemente finite reprezintă un instrument eficient pentru analiza sistemelor de ancorare utilizate în consolidarea exterioară prin exoschelete. Modelul numeric validat oferă o bază pentru extinderea analizei către configurații suplimentare și pentru fundamentarea dimensionării conexiunilor structurale. Împreună cu programul experimental prezentat anterior, această etapă contribuie la construirea unei metodologii integrate, în care comportarea locală a ancorajelor este corelată cu eforturile rezultate din analiza structurală globală a clădirii consolidate.

## Capitolul 6

## CERCETĂRI PRIVIND CONSOLIDAREA EXTERIOARĂ. STUDIU DE CAZ

### 6.1.1. Descriere generală a structurii analizate

Capitolul 6 reprezintă etapa aplicativă principală a cercetării, în care conceptele teoretice, rezultatele experimentale și modelarea numerică sunt integrate într-un studiu de caz privind consolidarea seismică a unei structuri existente din beton armat printr-un exoschelet exterior. Studiul urmărește evaluarea eficienței soluției de consolidare atât la nivel global, prin analiza răspunsului seismic al structurii, cât și la nivel local, prin determinarea eforturilor transmise la interfețele structurale și dimensionarea sistemelor de ancorare post-instalate.

Structura analizată este un tronson P+9E al unei clădiri existente din beton armat, alcătuit exclusiv din cadre, fără pereți structurali în configurația inițială. Tronsonul are o înălțime totală de aproximativ 35 m, cu niveluri de 3,50 m și dimensiuni în plan de aproximativ 39,60 m × 21,60 m.

Amplasamentul este caracterizat prin accelerația seismică de proiectare ag = 0,20g și perioada de control Tc = 0,7 s, conform P100-1/2013.

### 6.1.2. Vulnerabilitatea structurală inițială

Din cauza alcătuirii structurale inițiale, structura prezintă rigiditate laterală redusă, deplasări semnificative și depășiri ale limitelor admise pentru drifturile de nivel în starea limită de serviciu.

### 6.1.3. Obiectivul metodologic al studiului de caz

Soluția de consolidare propusă constă în introducerea unui exoschelet exterior din beton armat, amplasat pe două fațade longitudinale ale tronsonului. Exoscheletul este alcătuit din cadre și pereți structurali din beton armat, formând un sistem dual capabil să crească rigiditatea laterală globală și să redistribuie acțiunile seismice către elementele nou introduse. Sistemul exterior este prevăzut cu fundații proprii și este conectat la structura existentă la nivelul planșeelor, prin intermediul ancorelor post-instalate. Această soluție permite realizarea intervenției predominant din exteriorul clădirii, cu impact redus asupra spațiilor interioare. Modelele tridimensionale ale structurii existente și ale structurii consolidate prin exoschelet exterior sunt prezentate în Figurile 6.1 și 6.2.

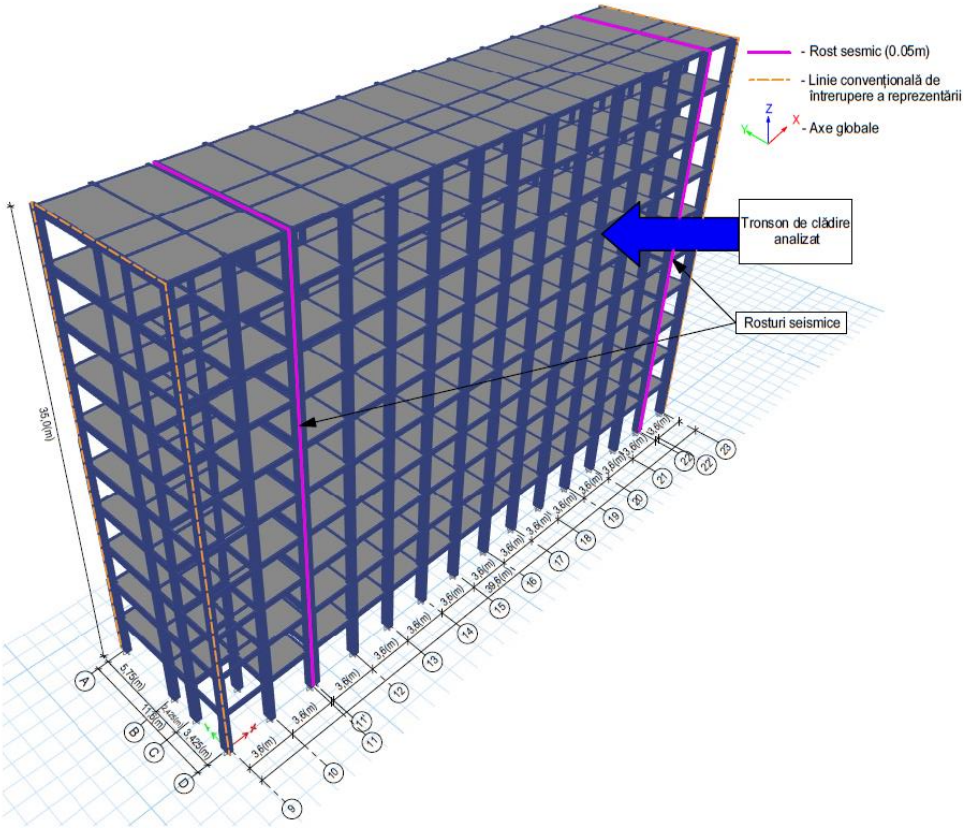



**Figura 6.1.** Modelul structural tridimensional al tronsonului existent analizat în ETABS (Bizu et al., 2026).

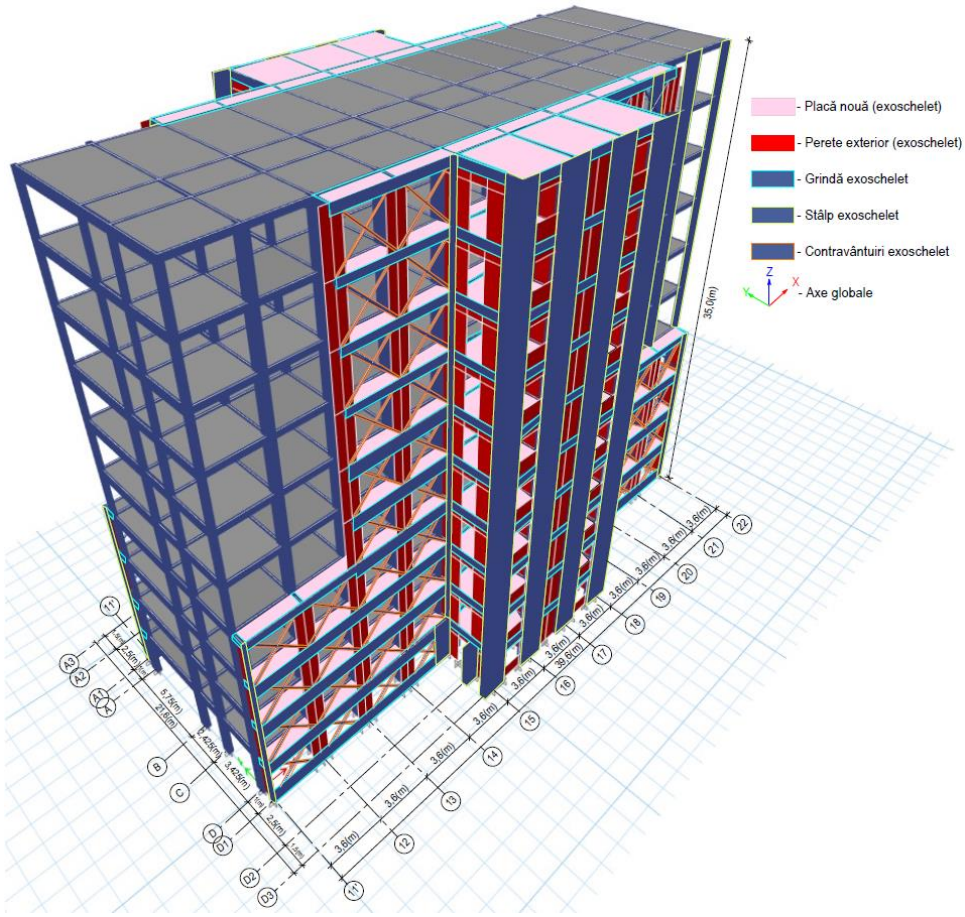



**Figura 6.2.** Model structural tridimensional al sistemului consolidat cu exoschelet din beton armat (ETABS).

### 6.2.1. Criterii de evaluare a răspunsului seismic

Metodologia de analiză adoptată în cadrul studiului se bazează pe dezvoltarea și compararea a două modele structurale tridimensionale realizate în programul ETABS, corespunzătoare structurii existente și, respectiv, structurii consolidate prin introducerea exoscheletului din beton armat. Pentru ambele configurații a fost utilizată analiza liniară în spectru de răspuns, efectuată în conformitate cu prevederile reglementărilor P100-1/2013 și EN 1998-1, astfel încât rezultatele obținute să poată fi comparate în condiții unitare de analiză. Elementele verticale și orizontale ale structurii, reprezentate de stâlpi și grinzi, au fost modelate cu elemente de tip frame, în timp ce planșeele au fost discretizate prin elemente de tip shell, capabile să reproducă atât comportarea în plan, cât și în afara planului acestora. Pentru modelarea planșeelor au fost adoptate diafragme semi-rigide, opțiune care permite surprinderea într-o manieră mai fidelă a distribuției eforturilor în planul fiecărui nivel, precum și a mecanismului real de transfer al acțiunilor dintre structura existentă și exoscheletul exterior. Această abordare metodologică asigură o reprezentare mai realistă a interacțiunii dintre cele două subsisteme structurale și constituie baza evaluării răspunsului seismic global, precum și a determinării eforturilor locale dezvoltate la nivelul interfețelor structurale. Cadrul metodologic al analizei seismice și al determinării eforturilor de interfață este sintetizat în Figura 6.3..

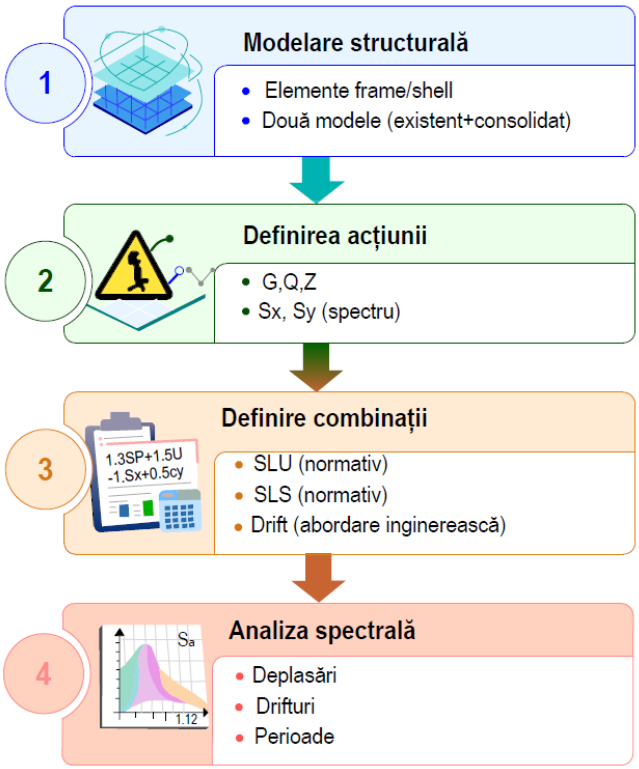



**Figura 6.3.** Cadrul metodologic al analizei seismice și al determinării eforturilor de interfață pentru structura consolidată.

### 6.3.3. Metodologia de determinare a eforturilor de interfață

Un element metodologic esențial al cercetării îl constituie utilizarea secțiunilor de tăiere (Section Cut) pentru determinarea eforturilor transmise la interfețele structurale dintre exoschelet și structura existentă. Această metodă permite extragerea directă a rezultantelor de forțe și momente la nivelul zonelor de contact dintre cele două subsisteme, prin integrarea exclusivă a elementelor implicate în mecanismul de transfer al eforturilor și eliminarea influenței elementelor structurale care nu participă direct la acest proces. În acest mod, eforturile locale utilizate la dimensionarea conexiunilor sunt determinate pe baza comportării reale a sistemului structural, fără simplificări care ar putea conduce la evaluări neconservatoare sau excesiv de conservatoare. Metodologia facilitează astfel corelarea directă dintre răspunsul global al structurii consolidate și solicitările locale dezvoltate în grupurile de ancore, constituind legătura dintre analiza structurală globală și verificările locale ale conexiunilor. Utilizarea metodei Section Cut permite, de asemenea, identificarea mecanismelor dominante de transfer al eforturilor pentru fiecare tip de interfață analizată și fundamentarea unor modele de calcul adaptate comportării mecanice specifice fiecărei conexiuni structurale. Modul de definire a secțiunii de tăiere la nivelul interfeței structurale este exemplificat în Figura 6.4.

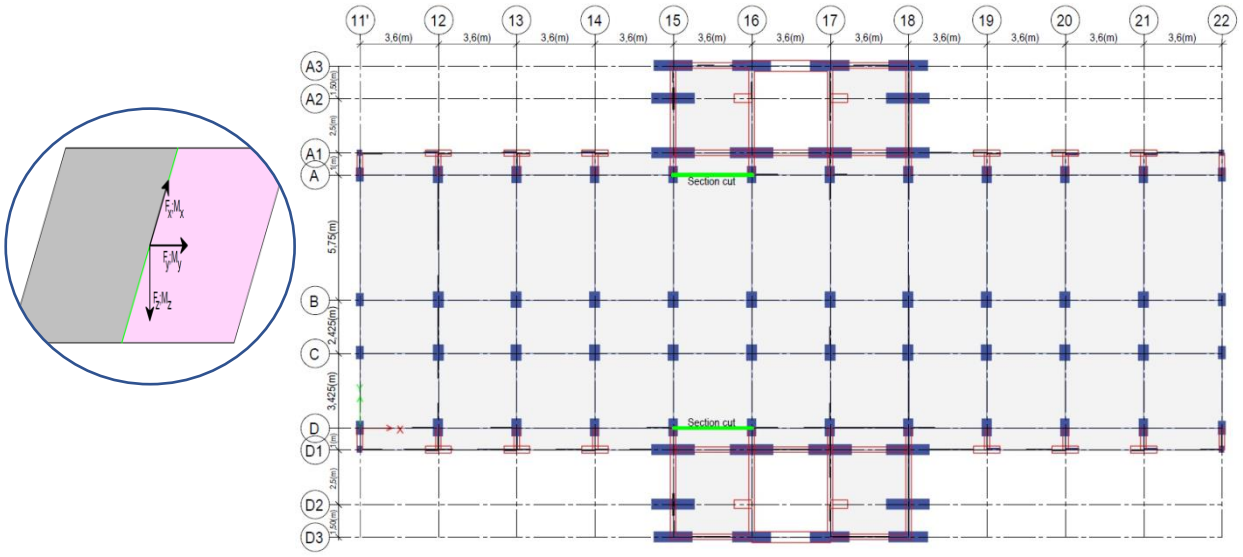



**Figura 6.4.** Definirea unei secțiuni de tăiere (Section Cut) la nivelul interfeței structurale (z = 35,0 m). (elaborare pe baza modelului ETABS).

### 6.4.1. Dimensionarea grupurilor de ancore pentru îmbinările analizate

Dimensionarea conexiunilor s-a realizat pentru trei tipuri reprezentative de îmbinări: stâlp existent – perete exoschelet, nod existent – grindă exoschelet și planșeu existent – placă exoschelet. Alegerea acestor configurații urmărește acoperirea principalelor mecanisme de transfer al eforturilor dezvoltate între structura existentă și sistemul exterior de consolidare, fiecare tip de îmbinare fiind caracterizat prin particularități mecanice și condiții distincte de solicitare. Pentru fiecare interfață au fost definite modele specifice de calcul, adaptate configurației geometrice, modului de transmitere a eforturilor și rolului structural pe care îl îndeplinește fiecare conexiune în ansamblul sistemului consolidat, astfel încât dimensionarea grupurilor de ancore să reflecte cât mai fidel comportarea structurală reală. Componentele rezultate prin metoda Section Cut au fost selectate în funcție de mecanismul fizic de transfer al eforturilor și nu exclusiv pe baza orientării axelor globale sau locale ale modelului numeric. Astfel, componenta normală pe planul interfeței a fost utilizată ca efort axial relevant pentru verificarea ancorelor, iar momentul care produce variația eforturilor normale în grupul de ancore a fost considerat determinant pentru evaluarea solicitării maxime. Această abordare permite stabilirea unei corespondențe directe între răspunsul structural global și verificările locale ale conexiunilor, constituind unul dintre elementele metodologice centrale ale cercetării și asigurând o dimensionare coerentă, fundamentată pe comportarea mecanică efectivă a fiecărei îmbinări. În același timp, metodologia adoptată facilitează identificarea mecanismelor dominante de transfer al eforturilor pentru fiecare tip de interfață analizată și permite corelarea rezultatelor obținute prin analiza globală cu verificările locale necesare dimensionării sistemelor de ancorare. Schema conceptuală de distribuție a eforturilor în grupul de ancore, pentru solicitarea combinată N+M, este prezentată în Figura 6.5.

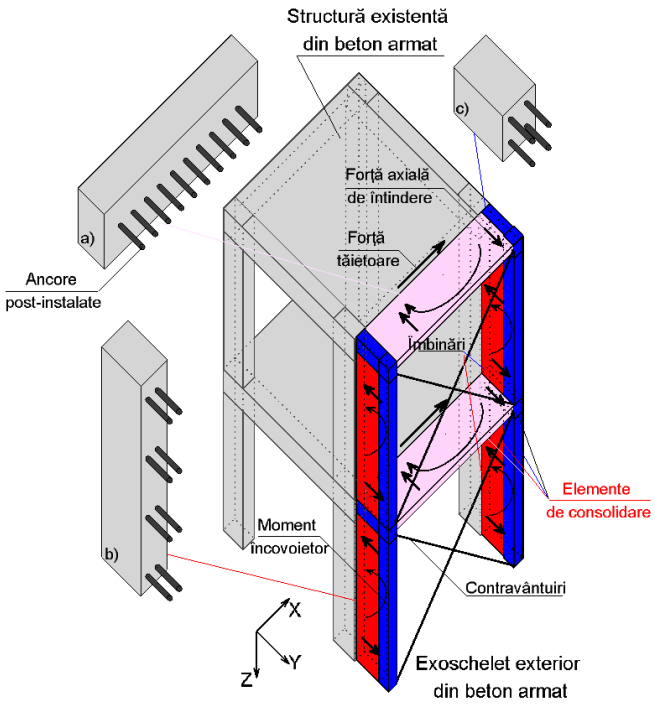



**Figura 6.5.** Schema conceptuală de distribuție a eforturilor în grupul de ancore sub acțiunea combinată N + M.

### 6.4.1.1. Îmbinarea stâlp existent – perete exoschelet

Pentru îmbinarea stâlp existent – perete exoschelet, dimensionarea a condus la o configurație cu 30 de ancore Ø22 mm, dispuse în două rânduri verticale, cu lungimea de ancorare de 400 mm. Eforturile de proiectare extrase prin Section Cut au fost NEd,y = 259,31 kN și MEd,x = 546,66 kNm, iar efortul maxim în ancora critică a rezultat NEd,max = 42,81 kN. Rezistența de calcul prin aderență a unei ancore a fost NRd = 44,51 kN, rezultând un coeficient de utilizare η = 0,96. Verificarea confirmă faptul că mecanismul guvernant este aderența, nu cedarea oțelului.

### 6.4.1.2. Îmbinarea nod existent – grindă exoschelet

Pentru îmbinarea nod existent – grindă exoschelet, soluția adoptată constă în 4 ancore Ø14 mm, cu lungimea de ancorare de 400 mm. Această îmbinare are un rol local, asociat continuității mecanice și compatibilității cinematice, fără a reprezenta mecanismul principal de transfer al acțiunilor seismice. Efortul maxim în ancora critică a rezultat NEd,max = 27,07 kN, iar rezistența disponibilă NRd = 28,34 kN, conducând la un coeficient de utilizare η = 0,96.

### 6.4.1.3. Îmbinarea planșeu existent – placă exoschelet

Îmbinarea planșeu existent – placă exoschelet reprezintă mecanismul dominant de transfer al acțiunilor seismice între structura existentă și sistemul exterior. Pentru această interfață a fost adoptată o configurație cu 24 de ancore Ø18 mm, cu lungimea de ancorare de 400 mm, dispuse pe o lungime activă de 3,30 m. Eforturile relevante extrase prin Section Cut au fost NEd,y = 330,49 kN și MEd,z = 301,62 kNm. Efortul maxim în ancora critică a rezultat NEd,max = 35,45 kN, iar

rezistența disponibilă NRd = 36,42 kN, cu un coeficient de utilizare η = 0,97. Rezultatul confirmă utilizarea eficientă a capacității grupului de ancore și rolul esențial al diafragmelor orizontale în mecanismul global de transfer.

#### 6.4.1.4. Concluzii privind dimensionarea îmbinărilor

Analiza celor trei îmbinări evidențiază o ierarhie clară a mecanismelor de transfer. Interfața planșeu existent – placă exoschelet asigură transmiterea principală a acțiunilor seismice prin diafragmele orizontale. Îmbinarea stâlp existent – perete exoschelet are rol important în compatibilizarea deplasărilor și în redistribuirea eforturilor axiale și de încovoiere. Îmbinarea nod existent – grindă exoschelet are rol local, asociat continuității elementelor de cadru. Toate cele trei îmbinări au fost dimensionate cu coeficienți de utilizare ridicați, între 0,96 și 0,97, ceea ce indică o dimensionare eficientă, fără rezerve excesive, dar cu respectarea condițiilor de siguranță. Sinteza dimensionării grupurilor de ancore pentru cele trei îmbinări analizate este prezentată în Tabelul 6.1.

**Tabelul 6.1.** Sinteza dimensionării grupurilor de ancore pentru îmbinările analizate.

| ***Tip îmbinare*** | ***n [buc]*** | ***Ø [mm]*** | ***lv [mm]*** | ***Pas [mm]*** | ***Componente Section Cut utilizate în calcul*** | $N_{Ed,max}$ ***[kN]*** | $N_{Rd}$ ***[kN]*** | ***η*** | ***Mecanism guvernant*** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Stâlp existent – perete exoschelet* | 30 | 22 | 400 | 200 | $N_{Ed,y}$ = 259,31 kN $M_{Ed,x}$ = 546,66 kNm | 42,81 | 44,51 | 0,96 | Aderență |
| *Nod existent – grindă exoschelet* | 4 | 14 | 400 | - | $N_{Ed,y}$ = 65,12 kN $M_{Ed,x}$ = 9,49 kNm | 27,07 | 28,34 | 0,96 | Aderență |
| *Planșeu existent – placă exoschelet* | 24 | 18 | 400 | 140 | $N_{Ed,y}$ = 330,49 kN $M_{Ed,z}$ = 301,62 kNm | 35,45 | 36,42 | 0,97 | Aderență |

Analiza structurală a clădirii existente a evidențiat o comportare globală defavorabilă, dominată de flexibilitatea sistemului de cadre. Perioada fundamentală de vibrație a structurii existente este de 2,066 s pe direcția X, iar deplasările maxime la nivelul superior ating 191,88 mm pe direcția X și 215,96 mm pe direcția Y. Aceste valori confirmă rigiditatea laterală redusă a structurii inițiale și necesitatea unei intervenții capabile să controleze deformațiile laterale și

drifturile de nivel. Rezultatele obținute evidențiază o capacitate limitată a structurii de a prelua eficient acțiunile seismice prin configurația structurală existentă și justifică introducerea unui sistem suplimentar de rigidizare destinat îmbunătățirii răspunsului seismic global. Modul propriu fundamental de vibrație al structurii existente este prezentat în Figura 6.6.

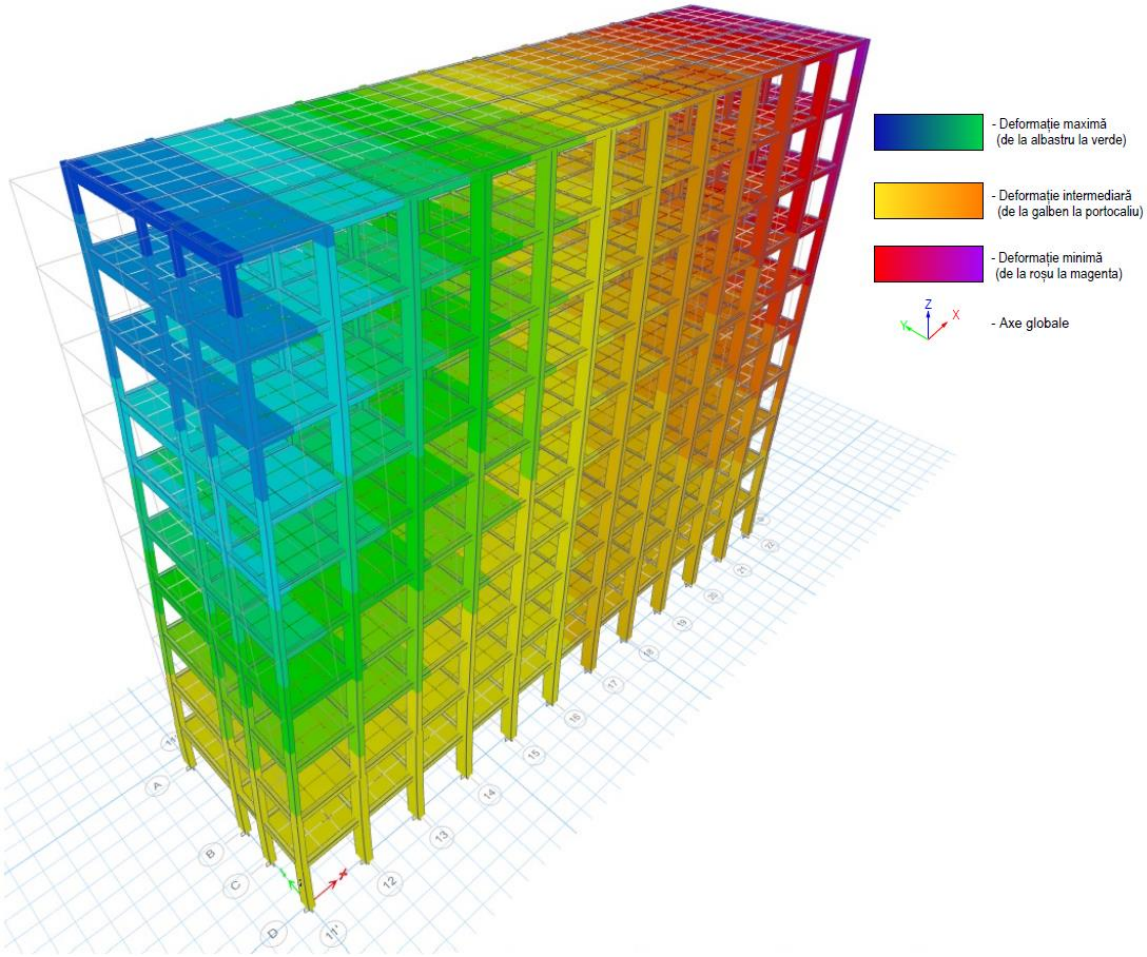



**Figura 6.6.** Modul propriu fundamental de vibrație al structurii existente (T=2.06 s).

### 6.4.3. Modelare și analiză structurală pentru clădirea consolidată

În urma introducerii exoscheletului din beton armat, comportarea dinamică a structurii se modifică semnificativ, ca urmare a creșterii rigidității laterale și a modificării mecanismului global de preluare a acțiunilor seismice. Perioada fundamentală de vibrație pe direcția Y se reduce la 0,683 s, iar perioada asociată modului predominant de translație pe direcția X ajunge la 0,3258 s, comparativ cu valorile corespunzătoare structurii existente. Reducerea perioadelor proprii de vibrație reprezintă un indicator direct al creșterii rigidității globale a sistemului structural și confirmă eficiența soluției de consolidare adoptate. Totodată, analiza formelor modale evidențiază faptul că exoscheletul participă activ la preluarea și redistribuirea acțiunilor laterale, contribuind la dezvoltarea unui comportament structural mai uniform și mai favorabil sub acțiunea seismică. Forma deformată a structurii consolidate indică deplasări laterale semnificativ reduse și o distribuție mai uniformă a deformațiilor pe întreaga înălțime a clădirii, ceea ce conduce la diminuarea diferențelor de deplasare dintre niveluri și la reducerea concentrațiilor locale de solicitări. În

consecință, transferul eforturilor între structura existentă și exoschelet se realizează într-o manieră mai echilibrată, iar răspunsul structural global devine mai eficient din punctul de vedere al controlului deplasărilor și al limitării efectelor de ordinul al doilea. Rezultatele obținute demonstrează că sistemul exterior nu funcționează doar ca un element suplimentar de rigidizare, ci contribuie în mod activ la modificarea mecanismului de comportare al întregului ansamblu structural, prin redistribuirea eforturilor și reducerea flexibilității inițiale a construcției. Modul propriu fundamental de vibrație al structurii consolidate este prezentat în Figura 6.7.

.

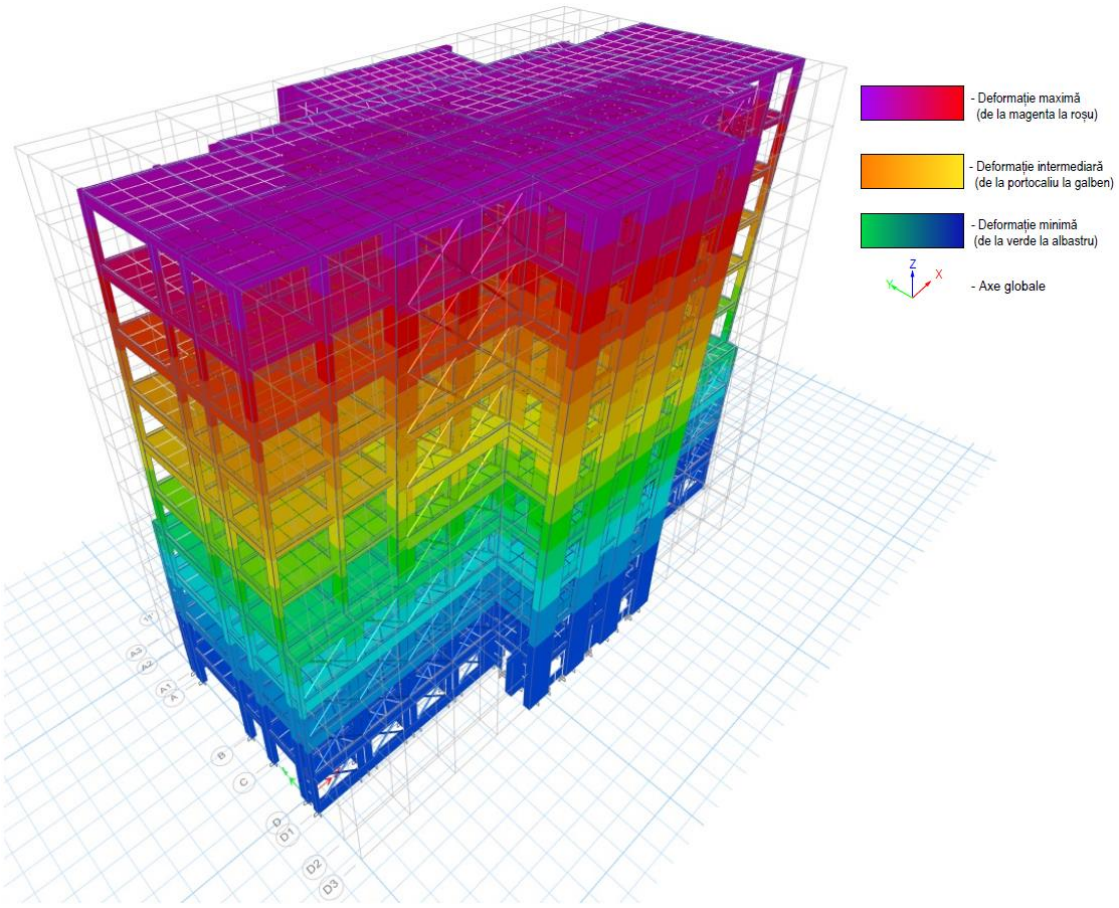



**Figura 6.7.** Modul propriu fundamental de vibrație al structurii consolidate T=0.68 s.

### 6.4.4. Analiza comparativă a răspunsului structural

Comparația deplasărilor laterale confirmă eficiența soluției propuse. La nivelul superior, deplasarea maximă pe direcția X se reduce de la 191,88 mm la 33,51 mm, ceea ce corespunde unei diminuări de aproximativ 82,5%. Pe direcția Y, deplasarea maximă se reduce de la 215,96 mm la 135,66 mm, corespunzător unei reduceri de aproximativ 37,2%. Structura existentă depășește limitele admise de deplasare la nivelurile superioare, în timp ce structura consolidată respectă cerințele pe întreaga înălțime. Compararea deplasărilor laterale maxime pe nivel pentru structura existentă și structura consolidată este prezentată în Tabelul 6.2.

**Tabelul 6.2.** Compararea deplasărilor laterale maxime pe nivel ale structurii existente și consolidate și verificarea limitei de deplasare la starea limită de serviciu.

| ***Nivel*** | ***Deplasare maximă X – structură existentă [mm]*** | ***Deplasare maximă X – structură consolidată [mm]*** | ***Deplasare maximă Y – structură existentă [mm]*** | ***Deplasare maximă Y – structură consolidată [mm]*** | ***Limită SLS [mm]*** |
|---|---|---|---|---|---|
| Etaj 9 | 191,88 | 33,51 | 215,96 | 135,66 | 175,00 |
| Etaj 8 | 183,86 | 30,39 | 202,99 | 121,98 | 157,50 |
| Etaj 7 | 169,86 | 27,02 | 185,35 | 105,89 | 140,00 |
| Etaj 6 | 152,37 | 23,35 | 163,67 | 88,64 | 122,50 |
| Etaj 5 | 132,12 | 19,47 | 140,16 | 71,47 | 105,00 |
| Etaj 4 | 110,21 | 15,50 | 114,32 | 54,30 | 87,50 |
| Etaj 3 | 85,64 | 11,61 | 86,86 | 37,95 | 70,00 |
| Etaj 2 | 58,72 | 8,00 | 58,61 | 25,18 | 52,50 |
| Etaj 1 | 32,95 | 5,27 | 31,53 | 13,64 | 35,00 |
| Parter | 11,25 | 2,31 | 9,91 | 4,52 | 17,50 |

Drifturile de nivel au fost analizate atât în starea limită de serviciu (SLS), cât și în starea limită ultimă (SLU). În SLS, limita admisibilă este de 17,50 mm, corespunzătoare unei înălțimi de nivel de 3,50 m. Structura existentă depășește această limită pe ambele direcții, atingând valori maxime de 27,51 mm pe direcția X și 28,51 mm pe direcția Y. După consolidare, driftul maxim se reduce la 5,49 mm pe direcția X și 17,42 mm pe direcția Y, încadrându-se în limitele admisibile. În SLU, ambele configurații respectă limita de 87,50 mm, însă structura consolidată prezintă valori semnificativ mai reduse, confirmând îmbunătățirea comportării globale. Distribuția drifturilor de nivel este prezentată în Figura 6.8, iar valorile maxime în SLS sunt sintetizate în Tabelul 6.3.

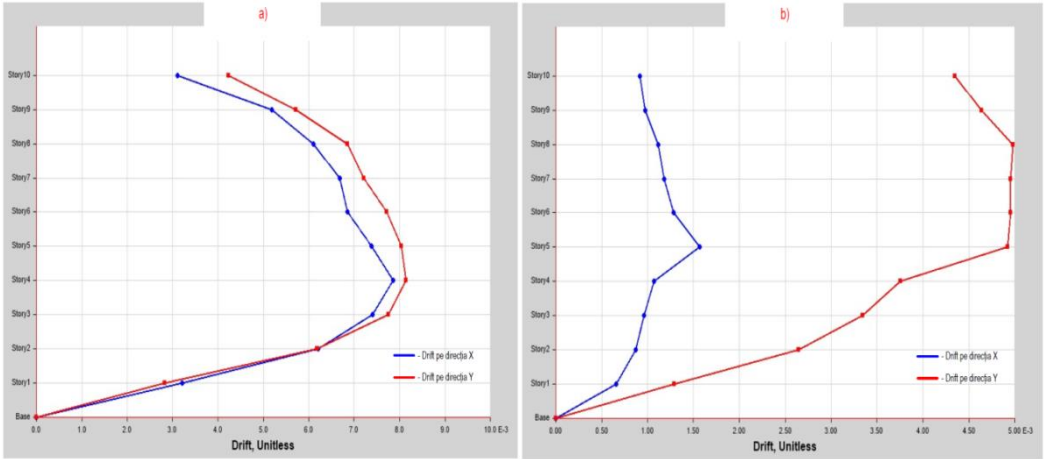



**Figura 6.8.** Distribuția drifturilor de nivel pe înălțimea structurii pentru variantele existentă și consolidată: a) Structura existentă; b) Structură consolidată.

**Tabelul 6.3.** Drifturile maxime de nivel în starea limită de serviciu (SLS) pentru structura existentă și consolidată.

| *Nivel* | *Drift SLS X – structură existentă [mm]* | *Drift SLS X – structură consolidată [mm]* | *Drift SLS Y – structură existentă [mm]* | *Drift SLS Y – structură consolidată [mm]* | *Limită SLS [mm]* |
|---|---|---|---|---|---|
| Etaj 9 | 10,87 | 3,20 | 14,83 | 13,11 | 17,5 |
| Etaj 8 | 18,16 | 4,48 | 19,99 | 17,42 | 17,5 |
| Etaj 7 | 21,37 | 5,07 | 23,99 | 16,50 | 17,5 |
| Etaj 6 | 23,39 | 4,13 | 25,24 | 13,87 | 17,5 |
| Etaj 5 | 23,98 | 5,49 | 27,02 | 13,56 | 17,5 |
| Etaj 4 | 25,81 | 5,05 | 28,12 | 12,65 | 17,5 |
| Etaj 3 | 27,51 | 4,08 | 28,51 | 10,48 | 17,5 |
| Etaj 2 | 25,91 | 3,78 | 27,14 | 8,09 | 17,5 |
| Etaj 1 | 21,72 | 2,78 | 21,63 | 4,55 | 17,5 |
| Parter | 11,25 | 1,86 | 9,91 | 1,80 | 17,5 |

Analiza modală confirmă modificarea mecanismului global de răspuns. În cazul structurii existente, primul mod este translațional pe direcția X, cu perioada de 2,066 s. După consolidare, modul fundamental devine translația pe direcția Y, cu perioada de 0,683 s, iar modul torsional devine al doilea mod propriu. Deși modul torsional apare pe poziția a doua, analiza raportului dintre deplasarea maximă și deplasarea medie pe nivel indică o valoare maximă de 1,285, localizată la nivelul parterului. Această valoare nu indică o neregularitate torsională pronunțată la nivel global, deoarece efectul este localizat, iar nivelurile superioare prezintă valori mai reduse. Compararea principalelor moduri proprii de vibrație pentru structura existentă și structura consolidată este prezentată în Tabelul 6.4.

**Tabelul 6.4.** Compararea principalelor moduri proprii de vibrație pentru structura existentă și consolidată.

| *Descriere* | *Mod de vibrație – structură existentă* | *T – structură existentă [s]* | *Mod de vibrație – structură consolidată* | *T – structură consolidată [s]* | *Reducere [%]* |
|---|---|---|---|---|---|
| Translație X | 1 | 2,066 | 3 | 0,3258 | 84,3 |
| Translație Y | 2 | 1,663 | 1 | 0,683 | 58,9 |
| Torsiune | 3 | 1,621 | 2 | 0,358 | 77,9 |

Sinteza verificărilor globale confirmă conformarea structurii consolidate față de criteriile analizate. Participarea modală cumulată depășește 90% pe ambele direcții, deplasările maxime de vârf se încadrează în limitele SLS, drifturile SLS și SLU respectă valorile admisibile, iar efectele torsionale rămân controlate. Rezultatele arată că exoscheletul nu produce doar o reducere cantitativă a răspunsului structural, ci și o modificare calitativă a mecanismului de comportare, prin trecerea de la un sistem flexibil de cadre la un ansamblu consolidat în care acțiunile seismice sunt redistribuite către sistemul exterior. Sinteza verificărilor globale ale structurii consolidate este prezentată în Tabelul 6.5.

**Tabelul 6.5.** Sinteza verificărilor globale ale structurii consolidate.

| ***Criteriu verificat*** | ***Valoare obținută*** | ***Valoare de referință*** | ***Verificare*** |
|---|---|---|---|
| Perioada fundamentală direcția Y | 0.683 s | - | ✓ |
| Perioada fundamentală direcția X | 0.325 s | - | ✓ |
| Participare modală $\Sigma_{UX}$ | 94.36 % | ≥90 % | ✓ |
| Participare modală $\Sigma_{UY}$ | 95.81 % | ≥90 % | ✓ |
| Deplasare maximă vârf X (SLS) | 33.51 mm | 175.00 mm | ✓ |
| Deplasare maximă vârf Y (SLS) | 135.66 mm | 175.00 mm | ✓ |
| Drift maxim SLS X | 5.49 mm | 17.50 mm | ✓ |
| Drift maxim SLS Y | 17.42 mm | 17.50 mm | ✓ |
| Drift maxim SLU X | 10.98 mm | 87.50 mm | ✓ |
| Drift maxim SLU Y | 34.84 mm | 87.50 mm | ✓ |
| Raport torsional maxim $D_{max}/D_{avg}$ | 1.285 | ≤ 1.35 (P100-1/2013, art. 4.4.3.2(5)) | localizat; nu indică neregularitate torsională pronunțată |

## 6.5. Concluzii

Un aspect important evidențiat în capitol este caracterul interdependent al parametrilor de proiectare. Creșterea rigidității exoscheletului reduce deplasările globale, dar poate conduce la majorarea eforturilor transmise către interfețe. În același timp, reducerea solicitărilor locale poate diminua mobilizarea sistemului exterior și, implicit, eficiența consolidării. Din acest motiv, configurația finală a exoscheletului nu a rezultat din maximizarea unui singur criteriu, ci din

identificarea unui echilibru între rigiditate globală, eforturi locale, fezabilitate constructivă și integrare funcțională.

Capitolul evidențiază și dimensiunea multicriterială a intervenției. Exoscheletul exterior nu este interpretat doar ca sistem structural suplimentar, ci ca infrastructură capabilă să susțină și funcțiuni complementare, precum fațade performante, fațade verzi, sisteme de umbrire, trasee tehnologice sau spații exterioare utilizabile. Astfel, soluția propusă permite corelarea consolidării seismice cu reabilitarea energetică, valorificarea arhitecturală și adaptarea funcțională a clădirii existente.

Integrarea arhitecturală a soluției de consolidare cu exoschelet este ilustrată conceptual în Figura 6.9.



(a) (b)

**Figura 6.9.** Randare conceptuală a soluției de consolidare cu exoschelet și integrare arhitecturală (a) randare conceptuală în condiții de iluminare diurnă; (b) randare conceptuală în condiții de iluminare nocturnă.

În concluzie, studiul de caz demonstrează eficiența consolidării exterioare prin exoschelet din beton armat pentru îmbunătățirea performanței seismice a structurilor existente. Rezultatele obținute validează metodologia integrată propusă, bazată pe corelarea dintre analiza globală în ETABS, extragerea eforturilor prin Section Cut, validarea experimentală și numerică a sistemelor de ancorare și dimensionarea locală a conexiunilor. Prin această abordare, Capitolul 6 constituie contribuția aplicativă centrală a tezei, demonstrând că performanța sistemului consolidat este guvernată de relația dintre comportarea globală a structurii și mecanismele locale de transfer al eforturilor.

# Capitolul 7

# CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII. VALORIFICAREA REZULTATELOR OBȚINUTE ÎN CADRUL PROGRAMULUI DE CERCETARE DOCTORALĂ. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

## 7.1. Concluzii generale

Capitolul 7 sintetizează rezultatele cercetării doctorale și evidențiază contribuțiile personale obținute în domeniul consolidării seismice a structurilor existente din beton armat prin sisteme exterioare de tip exoschelet. Teza propune o metodologie integrată de analiză și dimensionare, bazată pe corelarea dintre răspunsul structural global și mecanismele locale de transfer al eforturilor la nivelul interfețelor dintre structura existentă și sistemul exterior de consolidare.

Cercetarea a fost dezvoltată pe trei niveluri complementare: experimental, numeric și structural. La nivel experimental, au fost investigate sisteme de ancorare cu bare post-instalate, ancorate simultan în două elemente structurale distincte, configurație reprezentativă pentru conexiunile dintre structura existentă și exoschelet. Rezultatele au evidențiat faptul că mecanismul de cedare este controlat predominant de comportarea betonului, prin formarea conului de smulgere, în timp ce barele de armătură rămân în domeniul elastic. Această concluzie confirmă necesitatea orientării dimensionării către mecanismele de aderență și către capacitatea betonului suport.

La nivel numeric, modelarea cu elemente finite a permis analiza detaliată a distribuției tensiunilor și deformațiilor în zona de ancorare. Rezultatele au confirmat caracterul neuniform al transferului de eforturi și concentrarea solicitărilor în zona interfeței bară–adeziv–beton. Compararea rezultatelor numerice cu cele experimentale a arătat o concordanță satisfăcătoare, validând modelul numeric și demonstrând utilitatea acestuia pentru interpretarea mecanismelor locale de cedare și pentru extinderea analizei la configurații suplimentare.

La nivel structural, studiul de caz a demonstrat eficiența consolidării prin exoschelet din beton armat. Introducerea sistemului exterior a condus la reducerea semnificativă a deplasărilor laterale și a drifturilor de nivel, precum și la modificarea favorabilă a caracteristicilor dinamice ale structurii. Analiza a evidențiat că transferul principal al acțiunilor seismice se realizează prin diafragmele orizontale, în timp ce interfețele verticale au rol secundar, asociat compatibilității cinematice și redistribuirii locale a eforturilor..

## 7.2. Contribuții

O contribuție centrală a tezei constă în utilizarea metodei Section Cut pentru determinarea eforturilor de interfață și transpunerea acestora în solicitări locale pentru dimensionarea grupurilor de ancore. Această abordare asigură continuitatea dintre analiza globală a structurii și verificarea locală a conexiunilor, evitând ipotezele simplificatoare care pot conduce la soluții necorelate cu mecanismul real de transfer al eforturilor.

Contribuțiile personale ale cercetării includ dezvoltarea metodologiei integrate global–local, fundamentarea utilizării metodei Section Cut, definirea tipologiilor de îmbinări specifice exoscheletelor, realizarea unui program experimental original pentru ancoraje bilaterale, dezvoltarea și validarea modelului numeric FEM, identificarea ierarhiei mecanismelor de transfer și aplicarea metodologiei pe un studiu de caz reprezentativ pentru fondul construit din România.

### 7.3. Valorificarea rezultatelor programului de doctorat

Rezultatele obținute în cadrul programului de cercetare doctorală au fost valorificate prin publicarea, în calitate de autor și coautor, a 7 lucrări științifice, dintre care 2 în reviste internaționale cotate ISI, cu factor de impact, și 5 în reviste indexate BDI. Cele două lucrări ISI valorifică direct rezultatele prezentei teze, acoperind principalele direcții ale cercetării: investigarea experimentală și modelarea numerică a comportării sistemelor de ancorare post-instalate utilizate în conexiunile structurale (Bizu et al., 2025), respectiv dezvoltarea metodologiei integrate de analiză global–local pentru proiectarea conexiunilor dintre structurile existente și exoscheletele din beton armat, validată prin aplicarea acesteia în studiul de caz (Bizu et al., 2026). Prin aceste publicații, rezultatele tezei sunt introduse în circuitul științific internațional și susțin caracterul original și aplicativ al cercetării.

Din perspectivă practică, metodologia propusă are potențial de aplicare în proiectarea intervențiilor asupra clădirilor existente din beton armat, în special în cazul construcțiilor aflate în exploatare. Utilizarea exoscheletelor permite reducerea intervențiilor interioare, menținerea funcționalității clădirii pe durata lucrărilor și integrarea consolidării structurale cu strategii de reabilitare energetică și arhitecturală.

### 7.4. Direcții viitoare de cercetare

Direcțiile viitoare de cercetare vizează dezvoltarea unor modele neliniare avansate, investigarea comportării ciclice a ancorelor și îmbinărilor, optimizarea parametrică a sistemelor de ancorare, extinderea metodologiei către exoschelete metalice sau hibride, integrarea completă cu analiza energetică și realizarea unor studii economice bazate pe costul global al intervenției. De asemenea, este evidențiată necesitatea elaborării unor recomandări și ghiduri tehnice dedicate consolidării prin exoschelete, în vederea integrării acestor soluții în practica normativă.

În ansamblu, Capitolul 7 confirmă faptul că soluțiile de consolidare prin exoschelete din beton armat, proiectate printr-o metodologie integrată global–local, reprezintă o direcție viabilă pentru reducerea vulnerabilității seismice a clădirilor existente. Cercetarea demonstrează că performanța acestor sisteme nu depinde doar de rigiditatea exoscheletului, ci de corelarea dintre comportarea globală a structurii, mecanismele locale de transfer al eforturilor și capacitatea reală a sistemelor de ancorare.

# BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ


Asociația de Standardizare din România (ASRO). (2012). CR 0-2012: Bazele proiectării structurilor. Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice.

ASRO (Asociația de Standardizare din România). (2019). SR EN 1992-4:2019 — Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 4: Design of fastenings for concrete. ASRO.

Bizu, A.-N., Isopescu, D. N., Draghici, G., & Blanari, I. (2025). An experimental and FE modeling investigation of the pull-out behavior of anchoring solutions in concrete: A comparative study. Materials, 18(19), 4596. https://doi.org/10.3390/ma18194596.

Bizu, A.-N., Isopescu, D.-N., Draghici, G., Popa, M., & Nistorac, A. (2026). Integrated seismic retrofit strategy using an external RC exoskeleton: Section-cut-based force transfer assessment and connection typology analysis. Buildings, 16(11), 2050. https://doi.org/10.3390/buildings16112050.

CEN (European Committee for Standardization). (2004b). EN 1998-1: Eurocode 8 — Design of structures for earthquake resistance — Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. CEN.

CEN (European Committee for Standardization). (2018). EN 1992-4: Eurocode 2 — Design of concrete structures — Part 4: Design of fastenings for use in concrete. CEN.

Cook, R. A., Kunz, J., Fuchs, W., & Konz, R. C. (1998). Behaviour and design of single adhesive anchors under tensile load in uncracked concrete. ACI Structural Journal, 95(1), 9–26.

Di Lorenzo, G., Colacurcio, E., Di Filippo, A., Formisano, A., Massimilla, A., & Landolfo, R. (2020). State-of-the-art on steel exoskeletons for seismic retrofit of existing RC buildings. International Journal of Earthquake Engineering, 37, 34–47.

Eligehausen, R., Cook, R. A., & Appl, J. (2006). Behavior and design of adhesive bonded anchors. ACI Structural Journal, 103(6), 822–831.

Eligehausen, R., Mallée, R., & Silva, J. F. (2006). Anchorage in concrete construction. Ernst & Sohn.

Fardis, M. N. (2009). Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings: Based on EN-Eurocode 8. Springer.

FEMA (Federal Emergency Management Agency). (2018). FEMA P-58: Seismic performance assessment of buildings — Volume 1: Methodology (2nd ed.). Applied Technology Council.

fib (International Federation for Structural Concrete). (2020). fib Model Code for Concrete Structures 2020. Ernst & Sohn.

Fuchs, W., Eligehausen, R., & Breen, J. E. (1995). Concrete capacity design (CCD) approach for fastening to concrete. ACI Structural Journal, 92(1), 73–94.

Gkournelos, P. D., Triantafillou, T. C., & Bournas, D. A. (2021). Seismic upgrading of existing reinforced concrete buildings: A state-of-the-art review. Engineering Structures, 240, 112273.

Marini, A., Passoni, C., Belleri, A., Feroldi, F., Preti, M., Metelli, G., Riva, P., Giuriani, E., & Plizzari, G. (2017). Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: A proof of concept. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 26(7), 2475–2495. https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1363665.

Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice. (2013). P100-1/2013: Cod de proiectare seismică — Partea I: Prevederi de proiectare pentru clădiri. MDRAP.

Ministerul Dezvoltării Regionale și Administrației Publice. (2019). P100-3/2019: Cod de proiectare seismică — Partea III: Prevederi pentru evaluarea seismică a clădirilor existente. MDRAP.

Pampanin, S. (2012). Reality-check and renewed challenges in earthquake engineering: Implementing low-damage structural systems — from theory to practice. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 45(4), 137–160.

Passoni, C., Belleri, A., Marini, A., & Riva, P. (2020). Existing RC buildings with exoskeletons: State of research towards a design framework. In Proceedings of the 17th World Conference on Earthquake Engineering (17WCEE). Sendai, Japan.

Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., & Kowalsky, M. J. (2007). Displacement-based seismic design of structures. IUSS Press.

Riedel, W., Mark, K., & Thoma, K. (2009). Assessment of concrete structures under impact loading using numerical simulations. International Journal of Impact Engineering, 36, 654–667.

Sika Services AG. (2013). ETA-13/0779: European Technical Assessment for Sika AnchorFix-2+ post-installed rebar connections. European Technical Assessment Body.

Takeda, K., Tanaka, K., Someya, T., Sakuda, A., & Ohno, Y. (2013). Seismic retrofit of reinforced concrete buildings in Japan using external precast, prestressed concrete frames. PCI Journal, 58(3), 41–61. https://doi.org/10.15554/pcij.06012013.41.61.